

621.396
С56

Доклады научного семинара

Современные проблемы
радиофизики и радиотехники
2010

Выпуск 1

$$F(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} D_k \frac{\sin \omega_1 [t - k/(2f_1)]}{t - k/(2f_1)}$$

Омск 2012

21.356
056

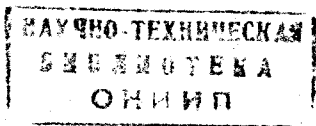
Омский научный семинар
«Современные проблемы радиофизики и радиотехники»

Доклады научного семинара
«Современные проблемы радиофизики и радиотехники»

2010

Выпуск 1

- 1/11 - 261 -



Омск - 2012

УДК 621.396+654.02+681.2+

ББК 32.95+32.97

Д633

Д633 Доклады научного семинара «Современные проблемы радиофизики и радиотехники» 2010. Выпуск 1/ отв. ред. С.В. Кривальцевич. – Омск: ОНИИП, 2012. – 96 с.

В сборнике представлены доклады участников Омского научного семинара «Современные проблемы радиофизики и радиотехники», сделанные в течение двенадцати заседаний в 2010 году. Семинар проводится на базе Омского государственного университета имени Ф.М. Достоевского с января 2010 года. Докладчики и участники семинара – студенты, аспиранты, сотрудники и преподаватели омских вузов, учреждений РАН, сотрудники омских предприятий.

УДК 621.396+654.02+681.2

ББК 32.95+32.97

Ответственный редактор – С.В. Кривальцевич

Оглавление

Вступительное слово	5
✓ Абрамова Е.Г., Гомзикова Т.А. Определение оптимальных конструкций емкостных и индуктивных элементов многослойных интегральных схем СВЧ, изготовленных по технологии LTCC.....	8
✓ Александрова А.А. Функциональные возможности современных радиомаршрутизаторов	13
Аралов Е.И. Программно-аппаратная реализация алгоритмов ЦОС в радиомаршрутизаторах.....	15
Бондарева И.Л., Бастриков Ю.А. Перспективы развития городских беспроводных сетей передачи данных.....	17
Вольхин Ю.Н., Мандрик А.М., Носов Ю.И. О перспективах использования методов и средств микроволновой фотоники в сверхширокополосной радиолокации и сверхширокополосной радиосвязи	22
✓ Гомзикова Т.А., Абрамова Е.Г. Широкополосные устройства частотной селекции диапазона СВЧ.....	34
Горяев П.В. Принципы построения антенных систем с цифровым формированием ДН КВ диапазона.....	37
✓ Еремин В.С., Прохоров П.В. Особенности перспективных методов передачи данных в Mesh сетях.....	41
✓ Ермоленко С.В., Ярош А.М. Кварцевые элементы термодатчиков, полученные инверсией кристаллической структуры.....	46
Киналь П.Н., Клыпин Д.Н. Аппаратно-программный комплекс кардиомониторинга на основе устройства мобильной связи.....	49
✓ Кривальцевич С.В., Подгорецкий В.В. Температурные зависимости радиофизических характеристики почв.....	53
✓ Лысак А.Б. Создание беспроводных сенсорных сетей на основе технологии ZigBee.....	58
✓ Лысак А.Б. Встраиваемые операционные системы современных коммутаторов.....	61
✓ Мартынович А.В. Беспроводные Mesh-сети.....	63

✓ Серебренников А.А. Применение разновидностей метаматериалов для изготовления нового класса СВЧ устройств.....	68
✓ Сорокин Д.В. Критерии эффективности для адаптивных процессоров антенных решеток.....	74
Строков А.А. Обзор протокола SimpliCI и его использование в устройствах с низким энергопотреблением.....	77
Строков А.А., Вольхин Ю.Н. Элементная база оптоэлектронной техники.....	81
Терехов Л.С. К определению разностного отношения данных натуральных измерений с наименьшей неопределённостью.....	91

Вступительное слово

Омский научный семинар «Современные проблемы радиофизики и радиотехники» начал свою работу в январе 2010 года на базе кафедры экспериментальной физики и радиофизики Омского государственного университета им. Ф.М. Достоевского.

Тесное взаимодействие кафедры экспериментальной физики и радиофизики с рядом предприятий радиоэлектронного комплекса Омской области (ОАО «ОНИИП», ОАО ОмПО «Иртыш», ОАО «ЦКБА» и др.), резкое увеличение целевого набора студентов и аспирантов по направлению предприятий придали новый формат отношений. Большинство активных, нацеленных на будущее студентов, магистрантов и аспирантов являются сотрудниками промышленных предприятий. В этой ситуации в 2009 году возникла идея создания научного семинара как площадки для обсуждения новых идей, поиска единомышленников и обмена мнениями между сотрудниками омских предприятий радиоэлектронной направленности, преподавателями, аспирантами и студентами омских вузов.

Основными целями научного семинара являются:

- создание благоприятной среды для обмена опытом;*
- обсуждение новых идей и подходов в радиофизике и радиотехнике;*
- привлечение молодых специалистов к научной и преподавательской деятельности в области радиофизики и радиотехники.*

В настоящее время работа семинара организована по следующим предметным секциям:

- «Радиофизическое зондирование»;*
- «Антенно-фидерные устройства»;*
- «Моделирование процессов и устройств»;*
- «Цифровая обработка сигналов»;*
- «Разработка, конструирование и производство аппаратуры»;*
- «Техника СВЧ».*

Плановые заседания семинара проводятся в последнюю субботу каждого месяца (кроме июля) в 11.30 ч. Место проведения – пр. Мира, 55а (1 корпус

ОмГУ им. Ф.М. Достоевского), ауд.25. Регламент проведения семинара: доклад – 15 мин., вопросы – 15 мин., обсуждение – 25-35 минут.

Участники и докладчики научного семинара – студенты, магистранты и аспиранты ОмГУ им. Ф.М. Достоевского, ОмГТУ, ОмГУПС и др. вузов и сузов; преподаватели и научные сотрудники ОмГУ им. Ф.М. Достоевского, ОмГТУ, ОмГУПС и др. вузов и сузов; специалисты и научные сотрудники радиоэлектронных предприятий.

В 2010 году состоялось 12 заседаний Омского научного семинара «Современные проблемы радиофизики и радиотехники», в рамках работы 5 секций семинара был заслушан 31 доклад. В работе семинара приняли участие более 120 студентов, аспирантов, преподавателей и специалистов, представляющих 11 организаций и учебных заведений Омской области. Наиболее активное участие с докладами принимали представители Омского государственного университета, ОАО «ЦКБА», Омского научно-исследовательского института приборостроения. Должности и место работы докладчиков указаны на момент участие в семинаре (2010 год).

Омский научный семинар «Современные проблемы радиофизики и радиотехники» продолжает работу. В 2011 году состоялось 11 заседаний, на которых было заслушано 28 докладов, готовится к печати второй сборник докладов семинара. Продолжается работа семинара и в 2012 году, на состоявшихся 6 заседаниях (на 1 июля 2012 года) было заслушано 14 докладов.

Необходимо сказать несколько слов о людях, которые вот уже на протяжении почти трех лет помогают организовывать и проводить семинар. На протяжении всего времени существования семинара его бессменным секретарем является Елена Геннадьевна Абрамова, аспирант Омского государственного университета, начальник научно-исследовательской лаборатории ОАО «ОНИИП». Её усилиями налажена работа по ведению протоколов заседаний и других документов семинара, подготовка заседаний. Елена Геннадьевна приглашает новых докладчиков, и сама выступила с рядом докладов по тематике секции «Техника СВЧ». Она же оказала большую помощь по редактированию и подготовке к печати данного сборника.

Забота о сайте семинара лежит целиком и полностью на Александре Леонидовиче Ворожцове, ныне инженере-технологе ОАО «ЦКБА». Его усилиями разработан и поддерживается сайт семинара, на котором всегда можно познакомиться с программой предстоящего семинара, отчетами о предыдущих заседаниях, новостями о конференциях и семинарах, проводимых в городе Омске. На сайте, который расположен по адресу www.radioseminar.omsu.ru, размещаются фотографии с заседаний семинара, презентации докладов и иные материалы, представленные авторами. В настоящее время заканчивается работа над новой версией сайта, как нам кажется, более информативной и удобной, которую планируем представить в конце 2012 года.

Также хочется выразить слова благодарности заведующему кафедрой экспериментальной физики и радиофизики, ректору ОмГУ Владимиру Ивановичу Струнину за поддержку в становлении семинара. Большую помощь оказывает ведущий инженер ОАО «ЦКБА» Юрий Николаевич Вольхин, активно выступающий на заседаниях сам и привлекающий к работе семинара своих учеников и коллег. Издание данного сборника осуществлено благодаря поддержке генерального директора ОАО «ОНИИП» Владимира Александровича Березовского. И, конечно, огромное спасибо всем докладчикам и участникам семинара.

Приглашаем на наш семинар всех желающих поделиться результатами своих научных достижений. По всем вопросам участия в семинаре и тематике его проведения вы можете обратиться непосредственно к руководителю семинара и секретарю семинара.

*Кривальцевич С.В.,
руководитель семинара
kriser2002@mail.ru*

Определение оптимальных конструкций емкостных и индуктивных элементов многослойных интегральных схем СВЧ, изготовленных по технологии LTCC

Е.Г. Абрамова (ОАО «ЦКБА», кафедра ЭФир ОмГУ им. Ф.М. Достоевского),
Т.А. Гомзикова (ОАО «ЦКБА», кафедра КПРА ОмГТУ)

В данной работе рассмотрены различные способы реализации некоторых пассивных элементов, входящих в состав многослойных интегральных схем на основе LTCC. Выбраны оптимальные конструкции емкостных и индуктивных элементов, входящих в состав топологии ФНЧ. Основными критериями при выборе конструкции каждого отдельного элемента схемы и моделировании являлись требования по минимизации габаритов конструкции и соответствию электрических параметров электродинамической 3D-модели параметрам «идеальной» модели.

Ключевые слова: частотные фильтры, многослойные интегральные схемы, LTCC.

В данной работе рассмотрены различные способы реализации некоторых пассивных элементов, входящих в состав многослойных интегральных схем на основе LTCC. Основная задача данной работы заключалась в проектировании фильтра нижних частот (ФНЧ), имеющего минимальные габариты и требуемые электрические параметры. Данная работа выполнялась в рамках освоения новой технологии низкотемпературной керамики, спекаемой за одну технологическую операцию (LTCC – Low Temperature Co-fired Ceramics).

На первом этапе работы был рассчитан ФНЧ пятого порядка с частотой среза $\omega_p = 600$ МГц. Затем в специализированной системе автоматизированного проектирования (САПР) было проведено моделирование схемы электрической ФНЧ (рис. 1), состоящего из идеальных элементов: катушек индуктивности и конденсаторов, - проведен электрический анализ, получена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) (рис. 2).

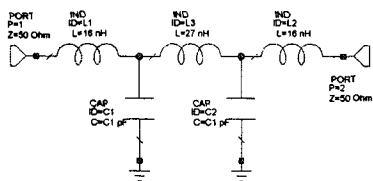


Рис. 1 Схема электрическая ФНЧ

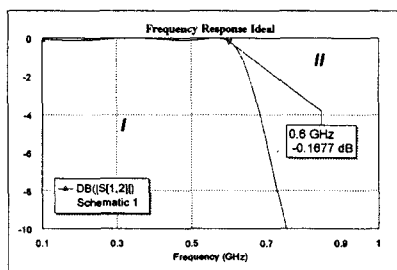


Рис. 2 АЧХ ФНЧ, состоящего из идеальных элементов:

- I – полоса пропускания (ПП);
- II – полоса заграждения (ПЗ)

Технология низкотемпературной керамики или технология LTCC позволяет реализовать в объеме подложки элементы с сосредоточенными параметрами с точностью, аналогичной точности фотолитографии.

В настоящее время при изготовлении фильтров применяются бескаркасные цилиндрические КИ (рис. 3), которые наматываются монтажницами вручную из золотой проволоки, фиксация такой катушки осуществляется эпоксидным лаком. При таком подходе неизбежно имеет место «человеческий фактор», следствием чего является значительный разброс параметров от одного образца КИ к другому и как следствие нестабильность конструктивных параметров: диаметра витка D и шага намотки H . Переход к технологии LTCC позволит избавиться от описанных выше недостатков.

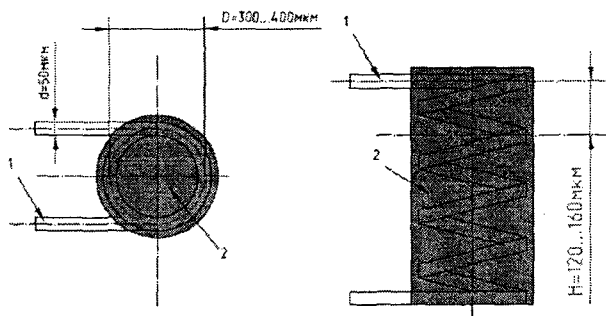


Рис. 3 Конструкция бескаркасной цилиндрической катушки индуктивности

поз. 1 – золотая проволока;
поз. 2 – эпоксидный лак

Катушки индуктивности, входящие в состав ФНЧ могут быть реализованы следующим образом:

- в виде спиральной катушки индуктивности, содержащей Г- или П-образные отрезки линии (рис. 4а);
- в виде плоской квадратной спирали (рис. 4б);
- в виде стековой катушки, индуктивность которой определяется суммарной индуктивностью всех катушек, находящихся в стеке, и взаимной индукцией (рис. 4г).

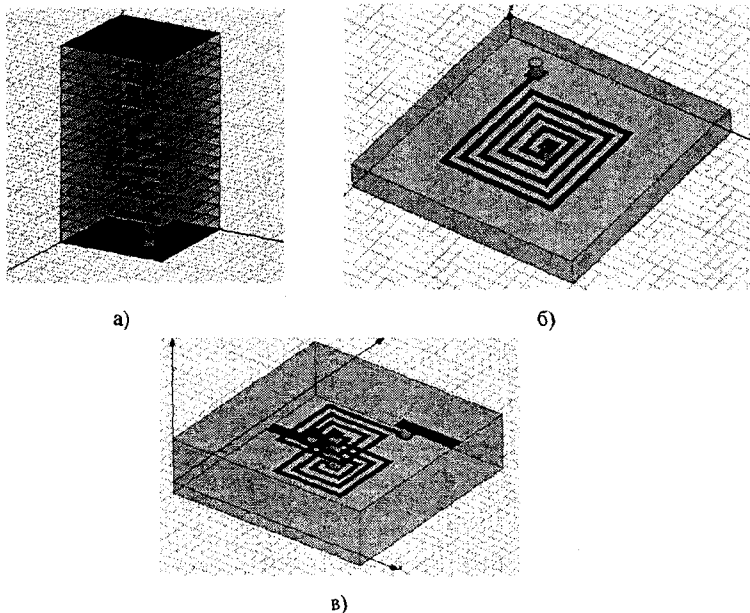


Рис. 3 Варианты реализации катушек индуктивности:
 а – спиральная катушка индуктивности, содержащая Г- или П-образные отрезки линии;
 б – катушка индуктивности в виде плоской спирали;
 в – стекловая катушка индуктивности, реализованная в двух слоях

Помимо этого в ходе работ были рассмотрены другие возможные варианты реализации катушек индуктивности, описанные в [1], а также катушки в виде плоской круглой спирали и стекловые катушки, содержащие несколько таких спиралей. Однако выбор был сделан в пользу вариантов реализации катушек индуктивности, приведенных на рис. 4, в силу их технологических и электрических параметров.

Далее перейдем к анализу возможных способов реализации емкостей, составляющих фильтр.

Конденсаторы могут быть реализованы следующим образом:

- в виде плоскопараллельных конденсаторов (рис. 5а);
- в виде встречно-штыревых конденсаторов (рис. 5б);
- в виде стекловых конденсаторов (рис. 5в).

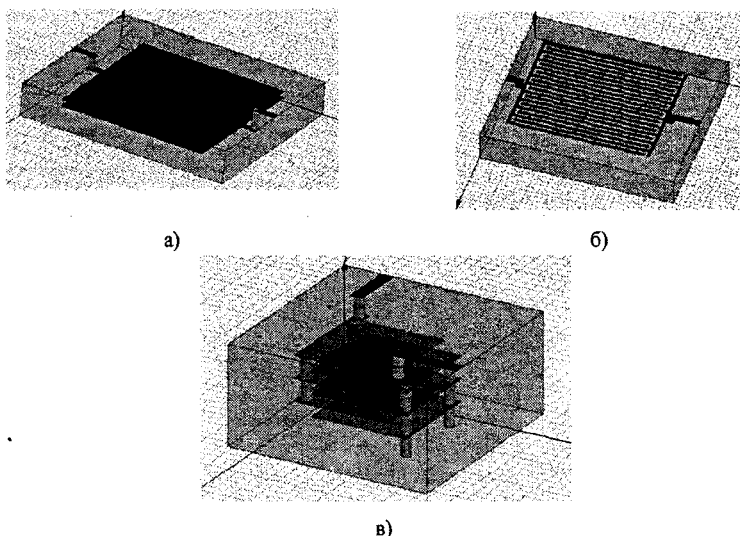


Рис. 5 Варианты реализации конденсаторов: а – плоскопараллельный конденсатор; б – встречно-штыревой конденсатор; в – стекловый конденсатор

Главным критерием в выборе конструкции конденсатора были его габариты, таким образом, мы остановились на стекловом конденсаторе (рис. 5в), габариты которого минимальны.

Затем были рассчитаны элементы различной конфигурации и требуемых номиналов. В ходе работы было построено несколько 3-D моделей ФНЧ, содержащих элементы различной конфигурации. После проведения электромагнитного моделирования в специализированном САПР, была определена оптимальная конструкция ФНЧ, приведенная на рис. 6, состоящая из стекловых катушек индуктивности, реализованных в двух слоях, и стекловых конденсаторов, реализованных в пяти слоях. АЧХ такого ФНЧ наиболее тождественна АЧХ идеальной модели (рис. 7).

Данный ФНЧ имеет габариты $5,5 \times 8,676 \times 2,16$ мм. Конструкция фильтра реализована в 10 слоях. Толщина каждого керамического слоя при моделировании принималась равной 216 мкм. Такая толщина слоя получается при спекании керамической ленты 951PX производства DuPont, имеющей термоусадку по оси Z $15,0 \pm 0,5$ %. Контактные площадки межслойных переходов имели размеры 254×254 мкм, диаметр штырей, играющих роль межслойных переходов, составил 200 мкм. Минимальная ширина внутренних проводников и зазоров принималась равной 100 мкм.

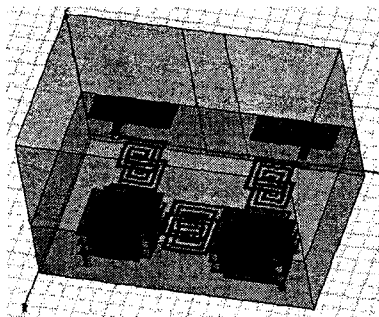


Рис. 6 Оптимальная конструкция ФНЧ, реализованная по технологии LTCC

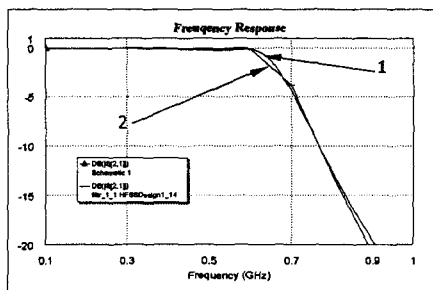


Рис. 7 АЧХ ФНЧ:

- 1 - реализованного на идеальных элементах;
- 2 - реализованного с использованием стекowych катушек и конденсаторов

В данной работы был проведен анализ различных способов реализации пассивных элементов с помощью технологии LTCC и выбраны оптимальные конструкции. Оптимальным вариантом для реализации индуктивностей выбрана катушка в виде квадратной спирали, не смотря на то что катушки в виде круглой спирали имеют меньшие габариты, однако последние являются более сложными в изготовлении. Для уменьшения габаритов в фильтре использованы катушки индуктивности в виде стековой плоской квадратной спирали. Оптимальным вариантом реализации емкостей выбран стековой конденсатор, т. к. при одинаковом значении емкостей габариты такого конденсатора минимальны. Использование выбранных способов реализации элементов позволило получить минимальные габариты ФНЧ и максимальное соответствие электрических параметров данного фильтра электрическим параметрам идеальной модели.

Литература:

[1] Абрамова Е.Г., Гомзикова Т.А. Определение оптимальной конструкции катушек индуктивности диапазона СВЧ, реализованных с использованием технологии LTCC.//Обмен опытом в области сверхширокополосных радиоэлектронных систем: сборник докладов научно-технической конференции. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – С. 5-9.

Функциональные возможности современных радиомаршрутизаторов

А.А. Александрова (ОмГУ им. Ф.М. Достоевского)

В статье рассматриваются принципы проектирования и работы современных радиосистем передачи данных. Выделены сервисные возможности по настройке, вопросы безопасности, диагностики неисправностей, типовые ошибки при проектировании и установке беспроводных сетей.

Ключевые слова: беспроводные сети передачи данных, радиомаршрутизаторы

Если для организации беспроводной сети в малом офисе достаточно установить одну беспроводную точку доступа, то при создании крупных корпоративных сетей с большим числом клиентов и базовых станций необходимо использовать более сложное оборудование. О нем и принципах его функционирования и пойдет речь в этой статье.

Стандартом IEEE 802.11 и его расширениями не определен механизм пропускания каждому пользователю. Такое возможно лишь на нестандартном оборудовании, например, на радиомаршрутизаторах Revolution [1].

Рассмотрев принципы проектирования [2] и работы радиомаршрутизаторов [3, 4], можно выделить их основные функциональные возможности.

Основными функциональными возможностями современного радиомаршрутизатора являются:

- Использование операционной системы реального времени WANfLeX со сверхбыстрым аппаратом маршрутизации;
- Универсальность системы. Возможность работы в качестве абонента и точки доступа;
- Автоматическое тестирование каналов;
- Автоматический выбор наилучшей базовой станции для регистрации по интегральному критерию качества канала;
- IP- роуминг;
- Динамическая IP- маршрутизация;
- Централизованная служба разрешения удалённого доступа RAPS;
- Встроенная система диагностики (модуль контроля радиосреды);
- Непрерывное отображение состояния каналов с абонентами;
- Непрерывная индикация состояния качества канала с базовой станцией;
- Мощный механизм автономного тестирования канала для наведения антенн;
- Защита от несанкционированного подключения и доступа;
- Разграничение скорости потоков по адресам сетей и/или абонентов;
- Назначение приоритетов потокам;
- Проверка на соответствие MAC и IP-адресов;

- Возможность сбора и отображения статистики по переповоротам передачи и приема пакетов в радиосреде;
- Возможность оценки радиочастотной обстановки (наличия сигналов) одновременно на нескольких частотных каналах;
- Возможность передачи группы мелких пакетов в одном большом (Bursting);
- Режим централизованной раздачи полномочий базовой станцией абонентам (Polling);
- Поддержка сетевого протокола управления (Simple Network Management Protocol, SNMP) версии 1 (MIB-II);
- Возможность потокового сжатия информации для повышения эффективности радиоканала;
- Автоматическая приоритезация VoIP-трафика.

Литература:

[1] Модельный ряд маршрутизаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lukon.ru/wireless/Infinet/models.htm>

[2] Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети : Принципы, технологии, протоколы: Учеб. для вузов. - СПб. : Питер, 2006. - 957 с.

[3] РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ. Система команд ОС WANFlex/ URL: ftp://ftp.infinet.ru/pub/DOC/CD_5000/RMA/Russian/Docs/wanflex.pdf (09.11.2009).

[4] InfiNet Wireless R5000. Техническое руководство/ URL: ftp://ftp.infinet.ru/pub/DOC/CD_5000/RMA/Russian/Docs/tum.pdf (09.11.2009).

Программно-аппаратная реализация алгоритмов ЦОС в радиомаршрутизаторах

Е.И. Аралов (ОмГУ им. Ф.М. Достоевского, ОАО «ОНИИП»)

В устройствах ЦСП, таких как радиомаршрутизаторы, необходимо реализовать различные алгоритмы цифровой обработки сигнала. Эти устройства могут быть построены на основе ПЛИС, благодаря целому ряду их свойств. Также ПЛИС могут использоваться в качестве устройств согласования внутренних линий связи.

Ключевые слова: ПЛИС, цифровая обработка сигнала, устройства широкополосного доступа.

Программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) — электронный компонент, используемый для создания цифровых интегральных схем. В отличие от обычных цифровых микросхем, логика работы ПЛИС не определяется при изготовлении, а задаётся посредством программирования. Основными производителями ПЛИС на текущий момент являются компании Altera, Xilinx и Actel.

Для начала необходимо выбрать тип ПЛИС. На сегодняшний день их два: CPLD и FPGA [1].

Программируемые вентильные матрицы (FPGA) представляются более предпочтительным решением в случае радиомаршрутизатора, поскольку помимо традиционных логических элементов (а их число в современных FPGA уже перевалило за миллион) они содержат и специальные блоки. В частности, даже бюджетное семейство Altera Cyclone V содержит умножители, DSP переменной точности (от 39 до 406 единиц; семейство Stratix V вообще имеет до 3510 ЦСП-блоков), аппаратные PCIe - блоки, ФАПЧ и контроллеры памяти DDR3, Gigabit Ethernet - контроллеры. Количество портов в этом семействе составляет от 300 до 688.

Включение ЦСП позволяет избавиться от одного из важнейших недостатков традиционных ПЛИС – невозможности выполнения вычислений с плавающей точкой. В то же время, ЦСП в отдельности имеет более низкую производительность в прочих видах вычислений.

Высокая производительность позволяет выполнять многие вычисления в режиме реального времени, что немаловажно для построения устройства, выполняющего сложные преобразования. Пропускная способность флагманских FPGA Virtex-7 HT фирмы Xilinx и Stratix V фирмы Altera достигает 28Гбит/с.

Относительно невысокая стоимость разработки ПЛИС по сравнению с разработкой микросхем с жестко фиксированной логикой дает большие возможности для экспериментального и мелкосерийного производства.

С улучшением технологического процесса (на сегодняшний день это уже 28нм) значительно понижается энергопотребление ПЛИС – примерно на 30-40% с каждым новым поколением FPGA [2]. Это дает возможность для создания

устройств с более долгой работой от автономных источников. Если понижение энергопотребления является критичной задачей при разработке устройства, в первую очередь надо обратить внимание на семейства IGLOO и ProASIC3 компании Actel.

ПЛИС дают возможность построения системы на кристалле (СнК). В этом случае отдельные части СнК (IP-блоки) могут разрабатываться независимо и покупаться в случае необходимости. Можно включить и аналоговые компоненты. Лидером в этой области также является вышеупомянутая компания Actel со своими семействами Fusion и Smart Fusion [3].

Немаловажно и то, что ПЛИС обладают возможностью динамической переконфигурации. При этом сегодня уже не возникает проблем защиты занесенной в память ПЛИС программы. В том же Cyclone V для этого используется алгоритм AES с 256-битным ключом.

Все выше упомянутые свойства делают ПЛИС соответствующими самым разнообразным требованиям, которые могут возникнуть у разработчика устройств при построении как компонентов ЦОС, так и модулей управления, обработки данных и т.п. [4]

Основными классами алгоритмов ЦОС, использующихся в широкополосных системах связи, являются алгоритмы цифровой фильтрации и ортогональных преобразований.

Многие цифровые фильтры достаточно просто реализовать в виде КИХ-фильтра. При этом позволяют достигнуть наилучших показателей производительности по сравнению с другими способами реализации.

Из ортогональных преобразований наибольшее распространение получили алгоритмы прямого и обратного быстрого преобразования Фурье. Они используются, например, в распространенной схеме OFDM (ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием).

Также в современных радиомаршрутизаторах реализуется технология MIMO (частным случаем которой является схема Аламути).

Литература:

- [1] Architecture of FPGAs and CPLDs: A Tutorial [Текст] / Stephen Brown и Jonathan Rose - IEEE Design and Test of Computers.1996.- №2.- стр. 42-57.
- [2] Максфилд К. Проектирование на ПЛИС. Курс молодого бойца [Текст] / К. Максфилд – М.: Издательский дом «Додэка – XXI». 2007.- 408 с. – 2000 экз. – ISBN 978-5-94120-147-1А.
- [3] Официальный сайт компании Actel [Электронный ресурс] / URL: <http://www.actel.com/> (дата обращения: 10.09.2010).
- [4] Стешенко В.Б. ПЛИС фирмы ALTERA. Проектирование устройств обработки сигналов [Текст] / Стешенко В.Б. – М.: Издательство «Додэка», 2000.– 128с.- 5000 экз.- ISBN 5-94020-001-Х.

Перспективы развития городских беспроводных сетей передачи данных

И.Л. Бондарева (ЗАО «Омск-Инфо»), Ю.А. Бастриков (ОмГУ им. Ф.М. Достоевского)

В докладе рассмотрены принципы построения современных городских сетей передачи информации. Рассматривается опыт эксплуатации городской сети ЗАО "Омск-Инфо" и перспективные направления развития широкополосного доступа, применяемые в данной беспроводной сети.

Ключевые слова: беспроводные сети, MESH-сети, MINT, MIMO.

Необходимость развития беспроводных технологий в потребности реального сектора экономики - найти решения по усовершенствованию и снижению стоимости подключения к сетям передачи информации соответствующего оборудования. Популярность беспроводных технологий достигается благодаря одному из основных преимуществ - быстрому развертыванию, как фрагментов сетей, так и сетей регионального значения. Стоит также отметить национальную особенность: в России хуже развита кабельная инфраструктура, части труднодоступных территорий не обеспечены широкополосными каналами связи.

На рис.1 приведена структура городской беспроводной сети передачи информации с используемыми отраслевыми направлениями деятельности потребителей клиентского сервиса этих сетей.

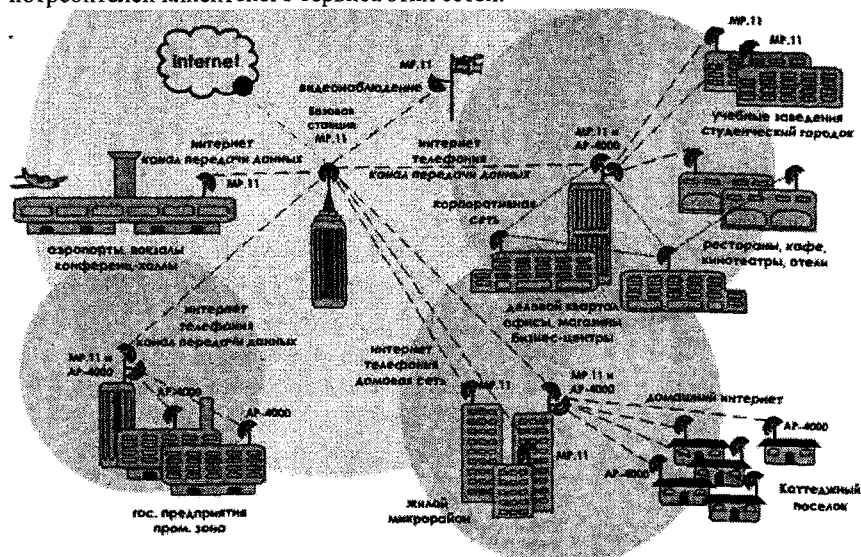


Рис.1 Структура беспроводной сети широкополосного доступа

Существует несколько видов топологий построения беспроводных широкополосных сетей передачи данных:

- «все со всеми»: ad hoc;
- «один с одним»: точка – точка;
- «один со многими»: точка – многоточка;
- «каждый с каждым»: mesh.

В рассматриваемой беспроводной сети «Омск-Инфо» применяются следующие топологии: точка – точка, точка – многоточка. Стандарты беспроводной связи - IEEE 802.11a и IEEE 802.11n.

Среди инновационных направлений в построении беспроводных сетей передачи информации является внедрение топологии типа Mesh, другими словами сети самоорганизующейся топологии.

Mesh-сети «просто» о «сложном». В чем уникальность данной топологии?

- создание зон сплошного информационного покрытия большой площади;
- масштабируемость сети (увеличение площади зоны покрытия и плотности информационного обеспечения) в режиме самоорганизации;
- использование беспроводных транспортных каналов (backhaul) для связи точек доступа в режиме самоорганизации;
- использование беспроводных транспортных каналов (backhaul) для связи точек доступа в режиме "каждый с каждым";
- устойчивость сети к потере отдельных элементов.

На рисунке 2 приведена структура Mesh-сети, как ячеистой сети, показаны связи, иллюстрирующие устойчивость передачи информации.

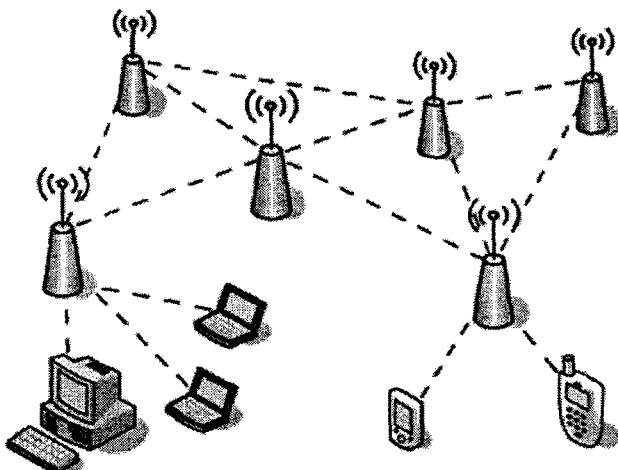


Рис.2 Структура Mesh-сети

Один из современных методов управления сетевой инфраструктурой является технология MINT. Применяется данная технология и в беспроводных сетях передачи информации. Технология MINT - это: (Mesh Interconnection Network Technology). Технология основанная на построении сетей с произвольными связями. Используя MINT можно построить беспроводную сеть абсолютно произвольной (любой конфигурации).

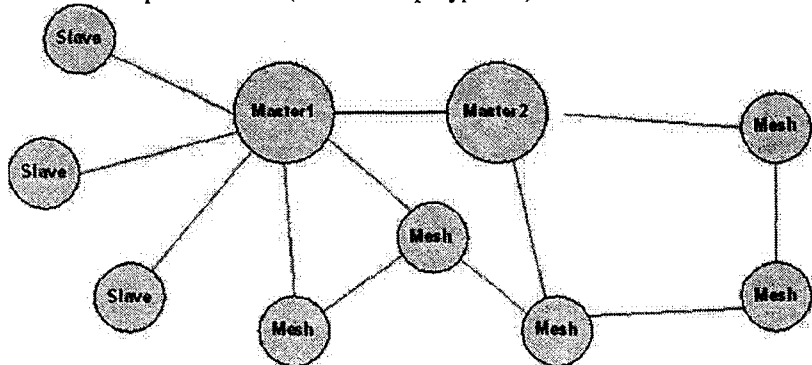


Рис.3 Структура связей MINT-технологии

→Самое главное свойство технологии MINT в том, что она позволяет представить любую беспроводную (а иногда и проводную, и даже гетерогенную сеть) как единый одноранговый сегмент Ethernet, а радиоинтерфейс, подключенный к такой сети, – как обычный интерфейс Ethernet, хотя и виртуальный.

→Виртуальный потому, что при его настройке нам всё же придётся учитывать специфические особенности такого интерфейса, такие как частота, тип модуляции и прочее. Но приложения, которые будут с ним работать, не заметят разницы с обычными интерфейсами.

MINT в радиосреде имеет следующие несомненные преимущества:

- а) Непрерывный контроль качества связи и топологии, оптимальные параметры соединения;
- б) Эффективный механизм autobitrate, прогноз и контроль;
- в) Улучшенный алгоритм маркерного доступа, меньше служебного трафика, более быстрая реакция;
- г) Автоматическое определение расстояния между узлами по радио;
- д) Доступ и управление устройством на L2 уровне;
- Возможность объединения интерфейсов в одну сеть;
- ж) Псевдо радио интерфейс;
- з) Возможность связи через Ethernet, VLAN, IP;
- и) Частотный роуминг на основе системы профилей, Roaming Leader бесшовный роуминг;

- к) Управление скоростью и задержкой.

```
#2> mint map
```

```
Interface rf4.0
```

```
Node 001 "BS_Z", Id xxxxxxxx, NetId 0, (master)
```

```
Freq 5xxx, Band 20, Sid 1, autoBitrate 24000 (min 18000), Noise -90
```

```
6 Active neighbors:
```

Id	Name	Node	Level	Bitrate	Retry	Err	Options	rx/tx	rx/tx	rx/tx
00001	ab1	0004 xxxxxxxx	1	14/20	18/24	0/0	0/0 /slave/			
00002	ab2	0013 xxxxxxxx	1	8/10	24/24	4/0	0/0 /master/			
00003	ab3	0013 xxxxxxxx	F	10/10	36/24	4/0	0/0 /master/			
00004	ab4	0013 xxxxxxxx	F	13/14	36/24	3/0	0/0 /master/			
00006	ab5	0004 xxxxxxxx	B	7/15	6/18	17/0	0/0 /slave/			
10938	ab6	0004 xxxxxxxx	8B	17/20	12/24	24/1	0/0 /slave/			

```
Total nodes in area: 7
```

Рис.4 MINT-map WanFlex OS беспроводной сети «Омск-Инфо»

MINT-map, команды внутрифирменной операционной системы WanFlex OS (рис.4) показывает устойчивую работу абонентов в радиосреде, в условиях очень разной энергетике каналов.

Перспективное направление развития беспроводных сетей передачи информации – это внедрение нового оборудования, использующего технологию MIMO.

Что такое MIMO?

MIMO (Multiple Input Multiple Output) - то технология передачи данных N передатчиками и их приема M приемниками. . Оборудование принадлежит к стандарту беспроводной связи IEEE 802.11n.

Основное преимущество MIMO заключается в способности осуществлять прием сигналов, пришедших по разным маршрутам.



Рис.5 Схема передачи данных по технологии MIMO

Внедрение инновационных беспроводных технологий, реализованных в утвержденных стандартах, позволяет создавать высокопроизводительные широкополосные сети передачи информации регионального уровня.

Параметры беспроводной сети «Омск-Инфо»

- реальная пропускная способность > 200 Мбит/с;
- пакетная производительность > 60000 пак/с;
- реальная спектральная эффективность > 6 бит/Гц/с;
- поддерживаемые диапазоны частот: 4.8 - 6.425 ГГц;
- поддерживаемые ширины каналов: 20 МГц;
- температурный диапазон $-55..+60^{\circ}$ С.

IP-архитектура:

- поддержка мультисервисного трафика (VoIP, Video-overIP, данные);
- полнофункциональный QoS,
- приоритизация трафика;
- интегрированный в каждое устройство маршрутизатор;
- эффективный протокол передачи E1 over IP (сигнализация DSS-1) в сети и каналах точка-точка;
- полный спектр возможностей IP-телефонии.

На примере сети «Омск-Инфо», можно увидеть перспективность развития беспроводных технологий. Последовательное исследование этих сетей позволит расширить области внедрения актуальных приложений для построения информационного общества.

Литература:

[1] Руководство по ОС WanFLEX. www.infinet.ru

[2] Описание MINT. www.infinet.ru

[3] Возможности оптимизации работы городской беспроводной сети И.Л. Бондарева, С.В. Кривальцевич // Сборник докладов научно-практической конференции «Беспроводные сети передачи данных. Омский выпуск. Университет», 15.09.2010

О перспективах использования методов и средств микроволновой фотоники в сверхширокополосной радиолокации и сверхширокополосной радиосвязи

*Ю.Н. Вольхин (ОАО "ЦКБА"), А.М. Мандрик (ОАО "ЦКБА"),
Ю.И. Носов (ОАО "ЦКБА")*

В данном докладе будет сделан обзор по одному из наиболее перспективных направлений развития современной радиотехники СВЧ - микроволновой фотонике. В докладе будут приведены наиболее яркие примеры применения методов и средств МWP в системах радиосвязи и радиолокации. Данный доклад предполагается сделать вступительным к серии докладов по МWP

Ключевые слова: фотоника, микроволновая фотоника, волоконно-оптическая радиосвязь, волоконно-оптические линии связи, полупроводниковые лазерные диоды, электрооптические модуляторы, фотодетекторы, волоконные усилители, электрооптические генераторы СВЧ, фотонные АЦП, АФАР.

Примерно 10 лет назад в зарубежной периодике стали появляться сообщения о создании твердотельных сверхвысокочастотных и сверхширокополосных электрооптических и оптоэлектронных устройств. Накопленная за эти годы информация позволяет сделать следующее предположение: в области радиотехники СВЧ происходят какие-то фундаментальные изменения. Причём речь идёт не о каких-то новых технологических или схемотехнических решениях в области традиционной радиоэлектроники, а о принципиально новых разделах радиотехники, которые называют фотоникой, радиофотоникой и микроволновой фотоникой (Microwave Photonics - MWP).

Данный доклад предполагается сделать обзорным и вступительным к серии докладов по МWP. Цель этого доклада - показать наиболее яркие примеры применения методов и средств МWP в системах радиосвязи и радиолокации.

Для начала необходимо немного поговорить о фотонике вообще - что это такое и, каковы причины её появления и бурного развития? Одним из первых термин "фотоника" использовал в 1967 году академик А.Н. Теренин [1]. Под этим термином он понимал "совокупность взаимосвязанных фотофизических и фотохимических процессов". Справедливости ради следует отметить, что такое определение относит данную дисциплину скорее к физической химии, а не к радиотехнике. В мировой науке получило распространение более позднее и более широкое определение фотоники, как раздела науки, изучающего системы, в которых носителями информации являются фотоны [2]. В этом смысле термин "фотоника" впервые прозвучал на 9-ом Международном конгрессе по скоростной фотографии (Denver. USA. 1970). Судя по всему, какого-то общепринятого определения фотоники, как отрасли науки и техники нет. С точки зрения авторов, применительно к радиотехнике наиболее приемлемым является определение, данное французским учёным Пьером Эйгрейном [3], который в 1967 году назвал

фотоникой науку об использовании света в различных сферах применения, включающую в себя генерацию, обнаружение и управление светом.

Принципиальное отличие фотоники от привычной нам электроники заключается в том, что вместо электрона в фотонных устройствах используется фотон. Фотонные устройства, в перспективе, будут иметь гигантские преимущества перед электронными устройствами. Так, например, фотоны, в отличие от электронов, не имеют веса и не создают сопротивления. Поэтому, фотонные устройства могут формировать импульсы длительностью менее 10-15 секунды [3], что примерно на 5-6 порядков меньше длительности самых коротких импульсов, формируемых электронными устройствами.

В настоящий момент в мире уже создана полноценная многопрофильная фотонная промышленность, которая специализируется на разработке и производстве

твердотельных источников света (полупроводниковых лазеров и светоизлучающих диодов),

оптических шин данных, оптических носителей информации типа CD, DVD, голографических сред, жидкокристаллических экранов, установок машинного зрения, компонентов оптоволоконных линий связи и т.д.

В последнее время, фотоника становится одним из ведущих рыночных секторов Европы, которая в свою очередь, является мировым лидером в этой области. Темпы развития фотоники впечатляют [3]: с 2003г. по 2010 г.

количество работ по этой тематике возросло в 3 раза;

стоимость продукции увеличилась более чем в 4 раза;

количество патентов возросло в 3 раза.

Поэтому, велика вероятность того, что 21-й век будут называть веком фотона, по аналогии с тем, как 20-й век называли веком электрона [3]. В пользу этого говорит и то, что электроника, в настоящий момент, уже подошла к своим потенциальным физическим пределам, хотя появление новых материалов, например графена, вероятно, ещё продлит на некоторое время “тегемонию” традиционной электроники.

Далее поговорим о причинах, по которым фотоника стала активно проникать в технику СВЧ, в результате чего собственно и появилась фотоника СВЧ или MWP. Исходя из накопленной информации, можно предположить следующее: основной причиной появления и широкого распространения MWP была потребность в развитии сверхскоростных (до 100 Гб/сек и выше) линий связи для передачи сверхширокополосных сигналов с шириной спектра до 100 ГГц и более. Для передачи таких сверхширокополосных сигналов необходимо использовать несущие с частотами в районе десятков, и даже сотен ГГц. Передача сигналов с такими несущими проблематична даже на незначительные расстояния: при передаче через эфир всего на 100 м сигнала с несущей в районе 50 ГГц, потери составят более 100 дБ. Потери в коаксиальных кабелях будут немного поменьше, но и тут, в лучшем случае, речь может идти о сотнях метров, причём стоит это будет очень дорого.

Поэтому, передача таких сверхширокополосных сигналов на дальние расстояния: десятки, сотни и даже тысячи километров была возможна только по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС). И только на конечном этапе передачи сверхширокополосного сигнала - в точке разветвления для абонентов локальной сети - можно использовать передачу через эфир (рис. 1).

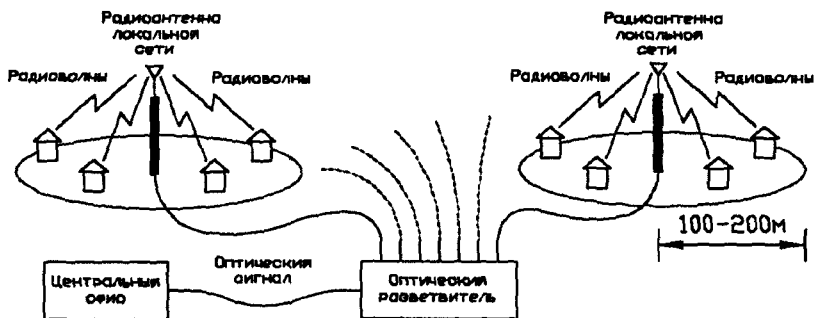


Рис. 1. Структурная схема сети ROF

Такой тип связи называется волоконно-оптической радиосвязью, или, как это принято называть за рубежом [4], Radio - over - Fiber (ROF). Более детально структурная схема ВОЛС для сети ROF приведена на рис. 2.

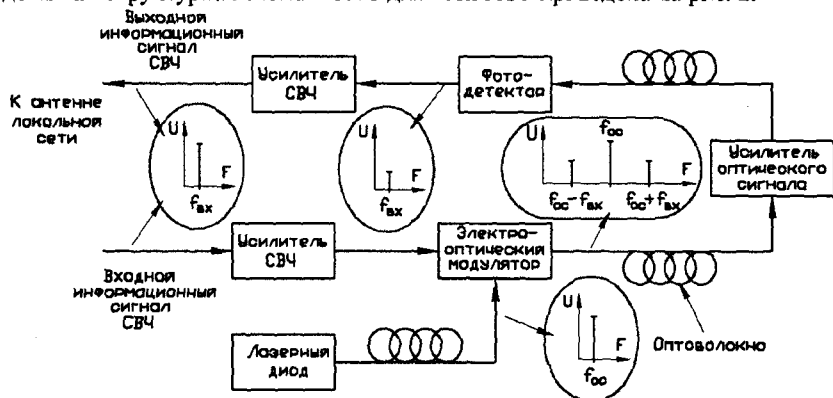


Рис. 2. Структурная схема ВОЛС для сети ROF

Передача сверхширокополосного СВЧ сигнала осуществляется следующим образом:

- сначала оптический сигнал модулируется входным информационным СВЧ сигналом, который может быть предварительно усилен во входном СВЧ усилителе;

- источником оптического сигнала является лазерный диод;
- модуляция осуществляется в электрооптическом модуляторе;
- далее промодулированный оптический сигнал поступает на вход оптоволоконного кабеля;
- в оптоволоконном кабеле сигнал может быть усилен оптическим волоконным усилителем;
- на выходе оптоволоконного кабеля стоит фотодетектор, в котором осуществляется демодуляция оптического сигнала;
- протестированный СВЧ сигнал, который является тождественной копией входного сигнала СВЧ, может быть усилен выходным усилителем СВЧ;
- выходной сигнал СВЧ поступает на эфирную антенну локальной сети, которая была приведена на рис. 1.

Таким образом, для того, чтобы сверхширокополосные сигналы СВЧ можно было передавать по ВОЛС, сначала этими сигналами необходимо промодулировать оптический сигнал.

Что представляет собой процесс модуляции с физической точки зрения? Это взаимодействие в оптической среде оптических и микроволновых сигналов, а изучением таких взаимодействий и занимается раздел науки, который называется MWP (ru.wikipedia.org/wiki).

Кроме оптико-микроволновых взаимодействий, MWP изучает

- работу фотонных устройств на СВЧ;
- методы фотонного управления СВЧ устройствами и линиями высокочастотной передачи;
- возможные варианты использования фотоники для выполнения различных функций в микроволновых схемах.

Далее поговорим об элементной базе MWP.

В качестве источников оптического сигнала используются полупроводниковые лазеры, которые с момента появления в начале 60-х годов прошли путь от относительно простых лазеров на основе гомоперехода [5] до современных лазеров [6,7,8] с распределённой обратной связью (distributed feedback laser) и лазеров с синхронизированными модами (mode-locked laser).

В качестве электрооптических модуляторов могут использоваться планарные модуляторы на основе интерферометра Маха-Цандера [9] или электропоглощающие модуляторы [10].

Все вышеперечисленные модуляторы в настоящий момент реализуются по планарным серийнопригодным технологиям, и более того, могут быть интегрированы с полупроводниковыми лазерными диодами в фотонных монолитных интегральных схемах [7].

В качестве сверхширокополосных усилителей СВЧ могут использоваться, например, практически все МИС сверхширокополосных усилителей фирмы Hittite Microwave Corporation (www.hittite.com).

В качестве канализирующей среды, по которой распространяется оптический сигнал, используется стандартные оптические волокна. Для усиления промодулированных оптических сигналов [11] могут использоваться волоконные эрбиевые усилители (Erbium Doped Fiber Amplifier - EDFA).

Для демодуляции оптических сигналов, промодулированных сверхширокополосными сигналами СВЧ, в настоящий момент используются [12] фотодиоды бегущей волны (traveling-wave photodiode).

Все перечисленные выше элементы тракта ВОЛС уже сейчас имеют диапазоны рабочих частот по СВЧ входам-выходам в несколько десятков ГГц. На основе такой элементной базы в настоящий момент создаются каналы связи с пропускной способностью более 100 Гб/с, а в перспективе - могут быть созданы каналы связи с терабитной пропускной способностью [13].

Необходимо отметить, что проблемами волоконно-оптической радиосвязи с каждым годом начинает заниматься всё больше и больше инженеров и учёных - исследователей. Последнее можно обосновать тем, что большая часть докладов, представляемых на ежегодных международных конференциях по MWP [4,10, 12, 14, 16, 17], посвящается проблемам такой радиосвязи.

Далее поговорим о возможных вариантах применения MWP в радиолокации. С момента появления более-менее дееспособных радиолокаторов в 40-х годах прошлого века радиолокация и радиосвязь развивались практически независимо друг от друга, так как большинство радиолокаторов работало на частотах от 1 ГГц и выше, а устройства радиосвязи - в лучшем случае, на частотах порядка нескольких сотен МГц. Но со временем, диапазоны частот для радиолокации и радиосвязи сначала стали сближаться, а сейчас вообще стали пересекаться, как в случае с волоконно-оптической радиосвязью. Более того, в настоящий момент всё чаще говорится о том, что происходит не только сближение диапазонов рабочих частот, но и областей применения систем РЛС, РЭБ и средств связи. Программы создания таких объединённых систем за рубежом уже осуществляются. Пример такой программы - это проект ВМФ США AMRFC - Advanced Multifunction RF Concept (передовая многофункциональная ВЧ концепция). Эта система [14] может одновременно генерировать несколько лучей: один для навигационного сканирования, второй - для радиосвязи в пределах прямой видимости, третий - для спутниковой связи.

Поэтому, не удивительно, что методы MWP стали применяться в радиолокации, и прежде всего в Активных Фазированных Антенных Решётках [15], которые, как известно, являются одним из основных атрибутов авиационных комплексов 5-го поколения.

Рассмотрим конкретные примеры использования методов MWP для реализации СВЧ трактов радиолокационных устройств и отдельных элементов этих трактов.

В некоторых источниках [16] описаны т.н. оптоэлектронные генераторы (opto-electronic oscillator - OEO). На рис. 3 приведена упрощённая схема такого генератора.

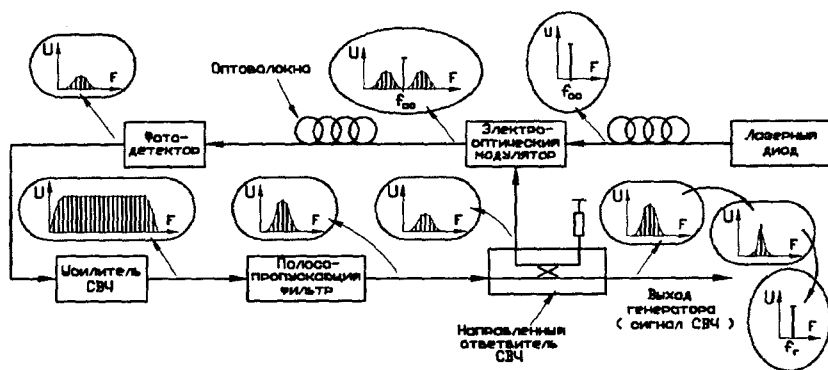


Рис. 3. Структурная схема ОЕО

Принцип работы ОЕО можно описать следующим образом. Широкополосный шумовой сигнал с выхода широкополосного усилителя СВЧ поступает на вход полосно-пропускающего фильтра. Этот ППФ формирует узкополосный шумовой сигнал. Часть этого шумового сигнала ответвляется направленным ответвителем СВЧ для модуляции оптического сигнала лазерного диода. Модуляция осуществляется в электрооптическом модуляторе. Далее промодулированный оптический сигнал поступает в оптоволокну, на выходе которого стоит фотодетектор. Продетектированный шумовой сигнал СВЧ поступает на вход усилителя СВЧ. Таким образом, формируется цепь положительной обратной связи, и создаются условия для самовозбуждения автогенератора. А в роли резонансного элемента этой обратной связи выступает оптический тракт - точнее отрезок оптоволокну. Добротность такого резонансного элемента может достигать 10^6 . Для сравнения - добротность диэлектрических резонаторов, которые применяются для реализации генераторов СВЧ примерно на 3 порядка ниже. Причём - 10^6 - это ещё не предел. Вместо оптоволокну можно использовать и другие фотонные элементы, имеющие более высокие добротности. Предложенная схема позволяет создавать фиксированные прецизионные малошумящие источники радиосигналов диапазона от сотен мегагерц до десятков гигагерц с рекордными характеристиками. Если фиксированный полосопропускающий фильтр в схеме рис. 3 заменить перестраиваемым, то можно получить ОЕО с перестройкой частоты. Необходимо отметить, что перестройка частоты ОЕО может осуществляться и другими способами [17].

Следует отметить, что в настоящий момент речь уже идёт не об экспериментальных образцах, а о серийно-выпускаемых изделиях, которые уже имеются на рынке. К примеру, серийно выпускаемый генератор фирмы «OEwaves» (www.oewaves.com) имеет на частоте 10 ГГц уровень частотных шумов -150 дБн/Гц при отстройке от несущей на 10 КГц.

Также, с использованием методов MWP реализуются перестраиваемые СВЧ - фильтры (www.oewaves.com) и другие элементы трактов СВЧ.

Одним из наиболее перспективных направлений развития MWP является разработка оптоэлектронных или фотонных АЦП.

Структурная схема такого АЦП приведена на рис. 4 [8].

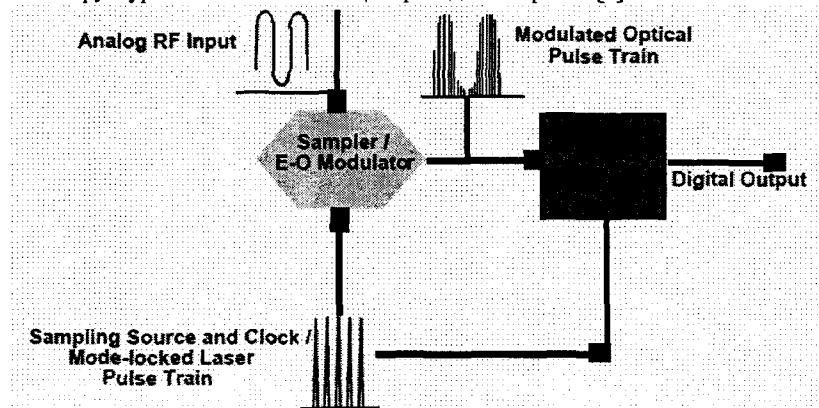


Рис. 4. Структурная схема фотонного АЦП

Известно, что процесс оцифровки начинается с дискретизации. В данном случае дискретизация входного СВЧ сигнала осуществляется в электрооптическом модуляторе при помощи сверхкоротких оптических импульсов. Выше уже говорилось, что фотонные устройства могут формировать импульсы длительностью до 10^{-15} сек, что позволит осуществлять дискретизацию сигналов с частотами до нескольких десятков ПГц. Есть сообщения, что в рамках выполнения программы PACT (Photonic A/D Converter Technology, [8]) планировалась разработка фотонных АЦП со скоростью до 100 Гвыб/с и с разрешающей способностью до 4-х бит.

Кроме того, необходимо отметить, что разработки ведутся не только по фотонным АЦП, но и по аналоговым электрооптическим процессорам. Известны следующие программы DARPA по данной тематике:

- Radio-Frequency Lightwave Integrated Circuits;
- Photonic Wavelength and Spatial Signal Processing;
- VLSI Photonics;
- Analog Optical Signal Processing.

Далее поговорим о возможных вариантах реализации приёмных трактов СВЧ с использованием методов MWP. Начнём с наиболее свежих примеров. В ряде источников (www.military.com) содержится информация о том, что в настоящий момент, в рамках работ по т.н. HPM - технологии (high-power microwave) создана и успешно испытана так называемая система вооружений прямого энергетического

действия, причём речь идёт об импульсных устройствах имеющих габариты порядка 10×10 см и уровень излучающей мощности до 30 МВт сейчас и 100 МВт в перспективе. Кстати говоря, такие результаты были достигнуты именно благодаря использованию методов микроволновой фотоники. Если из сотни таких устройств собрать панель размерами всего 1×1 м, то можно достигнуть суммарной мощности в 10 ГВт, достаточной для поражающей способности на тактически эффективных расстояниях. Поэтому, крайне актуальными становятся вопросы защиты входных трактов радиолокационных устройств, так как традиционные электронные защитные устройства в данном случае не спасут. Что в этом случае можно предпринять? Возможный вариант решения данной проблемы приводится в одном из патентов США [18]. В этом патенте описан неэлектронный, полностью диэлектрический входной каскад радиоприёмника, в котором использованы изоляционные свойства фотоники для устранения металлических электродов, соединяющих входные тракты приёмника с антенной. В упрощённом виде конструкция неэлектронного входного каскада выглядит следующим образом (рис. 5).

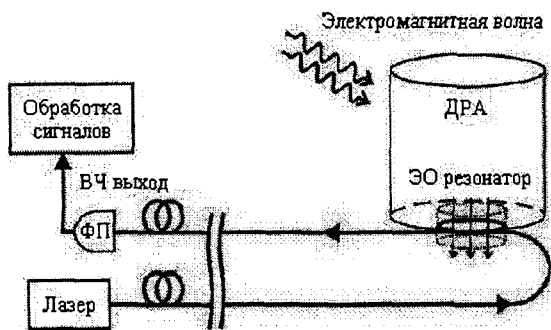


Рис. 5. Структурная схема неэлектронного входного каскада радиоприёмника

В полость внутри цилиндрической диэлектрической резонансной антенны (ДРА) определённым образом помещается электрооптический резонатор (ЭО-резонатор), реализованный в виде оптического резонансного диска. ДРА выполняет функцию концентратора принимаемой мощности радиочастотного излучения. ЭО-резонатор сконфигурирован на приём сигнала от вышеупомянутой ДРА за счёт эффекта Погкельса. Так же на этот электрооптический резонатор с оптического входа антенны поступает оптический сигнал от лазерного диода. Оптические и радиочастотные поля вступают во взаимодействие, в результате чего на оптическом выходе антенны формируется оптический сигнал, промодулированный принимаемым сигналом СВЧ. Этот сигнал поступает на фотоприёмник (ФП), на выходе которого восстанавливается принимаемый сигнал СВЧ. Таким образом, обеспечивается полная изоляция между границей воздушной среды и следующей за ней радиоэлектронной схемой, что делает возможным создание радиоприёмника,

устойчивого к воздействию электромагнитных импульсов высокой мощности и СВЧ - импульсов высокой мощности.

Очевидно, что это устройство не является широкополосным, но в этом же патенте приводится ещё одна конструкция входного каскада, которая имеет более широкий диапазон рабочих частот. Расширение диапазона рабочих частот происходит за счёт применения не одного, а нескольких оптических микрорезонансных дисков.

Рассмотрим другие примеры реализации элементов трактов СВЧ с использованием методов MWP.

Корпорация «Lockheed Martin» запатентовала схему доплеровского лоатора на основе фотонных элементов [19], в котором входной сигнал СВЧ сразу «забрасывается» в оптический диапазон (рис. 6).

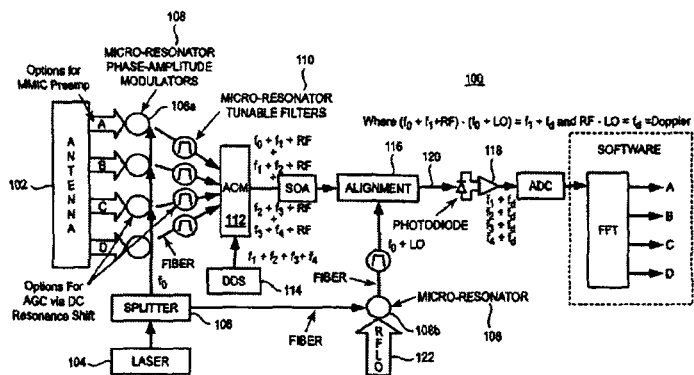


Рис. 6. Структурная схема доплеровского лоатора на основе фотонных элементов

В данной схеме в полном объеме используются свойства электрооптических резонаторов, как в качестве перестраиваемых фильтров, так и в качестве высокочувствительных модуляторов. Интересен и тот факт, что в этой схеме реализована традиционная концепция переноса спектра высокочастотного сигнала на диапазон промежуточных частот, удобных для обработки цифровыми методами.

Этот патент буквально подталкивает нас к идее создания многоканального сверхширокополосного супергетеродина, структурная схема которого приведена на рис. 7.

В этом приёмнике, оптический сигнал лазерного диода ЛД (Foc) сначала поступает на вход двухканального делителя оптических сигналов ДОС-2, один из выходов которого соединён с оптическим входом электро-оптического модулятора ЭОМ-(N+1). На СВЧ вход этого модулятора поступает СВЧ сигнал гетеродина (Fr), которым модулируется оптический сигнал. С выхода ЭОМ-(N+1)

промодулированный СВЧ сигналом гетеродина оптический сигнал ($F_{\text{ос.мод.}F_r}$) поступает на вход N-канального делителя оптических сигналов ДОС-3, где происходит деление данного сигнала на N синфазных и равноамплитудных сигналов. Далее каждый из этих N сигналов поступает на один из входов одного из сумматоров оптических сигналов СОС-1 - СОС-N, которые являются аналогами элемента "alignment" на рис. 6.

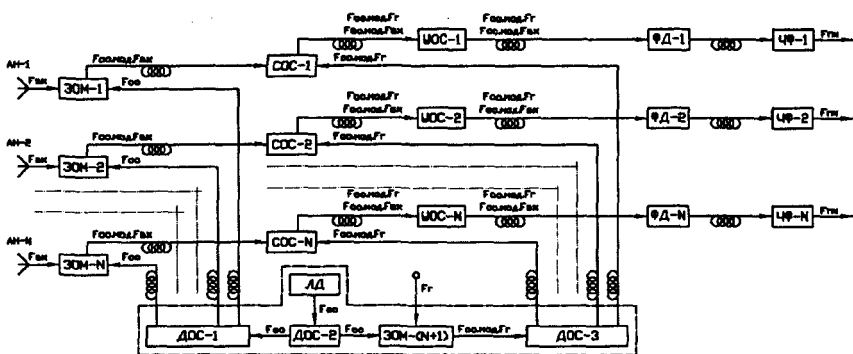


Рис. 7. Структурная схема многоканального сверхширокополосного супергетеродинного приёмника

(АН-1 - АН-N - радиочастотные антенны; ДОС-1 - ДОС-3 - делители оптических сигналов; ЛД - лазерный диод; СОС-1 - СОС-N - сумматоры оптических сигналов (аналоги alignment на рис. 6); УОС-1 - УОС-N - усилители оптических сигналов; ФД-1 - ФД-N - фотодетекторы; ЧФ-1 - ЧФ-N - частотные фильтры; ЭОМ-1 - ЭОМ-(N+1) - электрооптические модуляторы).

Со второго выхода двухканального делителя оптических сигналов ДОС-2 сигнал лазерного диода поступает на вход N-канального делителя оптических сигналов ДОС-1, где происходит деление данного сигнала на N синфазных и равноамплитудных сигналов. Далее каждый из этих N сигналов поступает на оптический вход одного из электрооптических модуляторов ЭОМ-1 - ЭОМ-N. На СВЧ входы этих модуляторов поступают СВЧ сигналы от антенн АН-1 - АН-N ($F_{\text{свч}}$), которыми модулируются оптические сигналы. Промодулированные входными СВЧ сигналами оптические сигналы ($F_{\text{ос.мод.}F_{\text{свч}}}$) с выходов ЭОМ-1 - ЭОМ-N поступают на свободные входы СОС-1 - СОС-N.

В каждом СОС-1 - СОС-N происходит суммирование (объединение) двух оптических сигналов, один из которых промодулирован СВЧ сигналом гетеродина, другой - входным (информационным) СВЧ сигналом. С выходов СОС-1 - СОС-N модулированные оптические сигналы ($F_{\text{ос.мод.}F_r}$ и $F_{\text{ос.мод.}F_{\text{свч}}}$) поступают в общие оптоволоконные тракты, где они сначала усиливаются волоконными усилителями оптических сигналов УОС-1 - УОС-N, а потом поступают на входы фотодетекторов ФД-1 - ФД-N. В этих фотодетекторах происходит смешивание (преобразование) данных оптических сигналов с образованием широкого спектра

выходных радиочастотных сигналов. Для выделения сигналов с требуемой промежуточной частотой (Пч): например, $F_c - F_g$ или $F_g - F_c$, на выходах этих фотодетекторов устанавливаются частотные фильтры ЧФ-1 - ЧФ-N, которые и выделяют сигнал с требуемой частотой.

Такой подход к построению приёмных трактов СВЧ позволяет значительно расширить диапазоны рабочих частот супергетеродинных приёмников. Кроме того, современные технологии MWP [13] позволяют объединять дискретные элементы MWP в монолитные многофункциональные интегральные схемы (ММИС). Пример такого объединения приведён на рис. 7, где пунктиром выделена возможная структура ММИС, состоящая из ЛД, ДОС-1, ДОС-2, ДОС-3 и ЭОМ-(N+1). Можно предположить, что при замене традиционной “электронной” элементной базы на интегральную элементную базу MWP, можно ожидать, как минимум, кратного уменьшения габаритов входных трактов СВЧ супергетеродинных приёмников.

Таким образом, на основе вышеизложенного можно сделать следующий вывод: MWP начинает быстрыми темпами проникать, как минимум, во входные тракты радиолокационных и радиоприёмных устройств.

Поэтому всем разработчикам и производителям радиолокационной техники, а так же разработчикам сетей сверхширокополосной радиосвязи, необходимо скоординировать усилия с целью организации общегосударственных программ развития фотоники вообще, и микроволновой фотоники в частности. Кроме того, промышленным предприятиям совместно с высшими учебными заведениями необходимо разработать и запустить учебные программы по подготовке специалистов в области MWP.

Литература:

- [1] Теренин А.Н. Фотоника молекул красителей. Л.: Наука, 1967. 616с.
- [2] Акопян М.Е. К истории развития фотоники в Санкт-Петербургском (Ленинградском) государственном университете. www.niif.spbu.ru/departments/chem-ph/Texts/Photonics.doc
- [3] Photonics for the 21st Century. Consolidated European Photonics Research Initiative [ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/ist/docs/dir_c/mnoc/photronics_for_the_21st_century_en.pdf](http://ftp.cordis.europa.eu/pub/ist/docs/dir_c/mnoc/photronics_for_the_21st_century_en.pdf)
- [4] B. Charbonnier, H. Le Bras, P. Urvoas, Q.T. N'Guyen, M. Huchard, A. Pizzinat. Upcoming perspectives and future challenges for ROF. - 2007 International Topical Meeting on Microwave Photonics.
- [5] П.Г. Елисеев. Полупроводниковые лазеры - от гомопереходов до квантовых точек. Квантовая Электроника, 2002, Том 32, № 12, с. 1085-1098. <http://www.quantum-electron.ru>
- [6] Хансперджер Р. Интегральная оптика: теория и технология. Изд. "Мир", Москва, 1985 г., 384 стр.

- [7] Philipp Gerlach. DFB Laser Integrated Electroabsorption Modulators. Annual Report 2003, Optoelectronics Department, University of Ulm. www-opto.e-technik.uni-ulm.de/forschung.
- [8] Photonic analog-to-digital converters. AFRL-SN-RS-TR-2006-109. In-House Final Technical Report. March 2006. www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA449267
- [9] Слепов Н.Н. Оптические волновые конверторы и модуляторы. Электроника: Наука, Технология, Бизнес, № 6, 2000 г.
- [10] Yong-Duck Chung, Young-Shik Kang, Kwang-Seong Choi, Sung-Bock Kim, and Jeha Kim. RF gain and IMD Characteristics of Electroabsorption Modulator for Analog Applications. - 2005 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2005).
- [11] R. J. Mears, L. Reekie, M. Jauncey, and D. N. Payne, "Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μm ", *Electron. Lett.* 26, 1026 (1987).
- [12] Joe C. Campbell and Andreas Beling. High-speed, waveguide photodiodes. The 2008 IEEE International Meeting on Microwave Photonics.
- [13] Прорыв Intel в области кремниевой фотоники. КомпьютерПресс №11, 2006. <http://www.compress.ru/article.aspx?id=16851&iid=781>
- [14] Joon Y. Choe. Defense RF Systems: Future Needs, Requirements, and Opportunities for Photonics. 2005 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2005).
- [15] Активные фазированные антенные решётки/ Под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. - М.: Радиотехника, 2004. - 488с.: ил.
- [16] Nguyen Lam Duy, Bernard Journet, Isabelle Ledoux-Rak, Joseph Zyss, Luong Vu Hai Nam, Vu Van Luc. Opto-electronic Oscillator: Applications to Sensors. The 2008 IEEE International Meeting on Microwave Photonics.
- [17] Sascha Fedderwitz, Vitaly Rymanov, Mario Weiß., Andreas Stöhr, Dieter Jäger, Andreas Gerhard Steffan, Andreas Umbach. Ultra-Broadband and Low Phase Noise Photonic Millimeter-Wave Generation. The 2008 IEEE International Meeting on Microwave Photonics.
- [18] Bahram Jalali, Chia-Jen Hsu, Bijan Houshmand. Non-electronic radio frequency front-end with immunity to electromagnetic pulse damage. Patent № US 7 450 790 B1.
- [19] Brett A. Williams, Mark A. Turner. Miniaturized microwave-photonics receiver. Patent № US 7 724 179 B2.

Широкополосные устройства частотной селекции диапазона СВЧ

Т. А. Гомзикова (ОАО «ЦКБА», кафедра КПРА ОмГТУ),
Е.Г. Абрамова (ОАО «ЦКБА», кафедра ЭФиРФ ОмГУ им. Ф.М. Достоевского)

В статье рассмотрено проектирование многоканальное устройства частотной селекции диапазона СВЧ. При расчете данного устройства учитывались требования для его изготовления с помощью технологии на основе керамики с низкой температурой обжига (LTCC).

Ключевые слова: полосковые линии передачи, фильтры на связанных линиях, технологий LTCC.

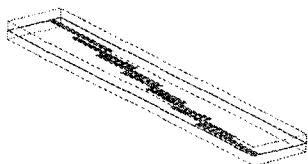
Фильтры являются одним из важных компонентов радиоэлектронных устройств диапазона сверх высоких частот (сантиметровые волны от 1 до 10 см (3-30ГГц)).

В разработке новых схемотехнических и конструктивных реализаций аналоговых фильтров главными критериями являются его электрические параметры и габариты устройства. Выполнение фильтров на дискретных элементах в диапазоне СВЧ практически невозможно, так как элементы будут представлять собой сверхмалые конденсаторы и катушки, параметры которых варьируются в большом диапазоне, что сказывается на характеристике устройства, и работа с такими элементами представляет собой трудоемкий процесс, поэтому предпочтительна реализация фильтров диапазона СВЧ в полосковом виде.

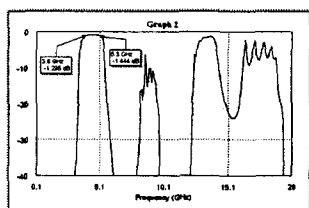
Возможно несколько вариантов исполнения таких фильтров:

- фильтры на скачках волновых сопротивлений;
- фильтры на связанных полосках;
- фильтры на четвертьволновых шлейфах;
- фильтры на встречных штырях.

В работе рассматриваются фильтры на связанных полуволновых резонаторах. Их реализация на несимметричной полосковой линии в виде гибридных интегральных схем с полосковыми выводами (рис. 1 а) имеет недостатки, во-первых, достигнуты минимально возможные габаритные размеры устройства, во-вторых, появляется паразитная полоса пропускания на удвоении средней частоты.



а)



б)

Рис. 1 – а) топология фильтра на связанных полуволновых резонаторах, выполненного на несимметричной полосковой линии; б) АЧХ фильтра.

Переход на многослойные технологии позволяет избавиться от этих недостатков, так как возможно собрать в стек топологии, которые сейчас располагают в одной плоскости, и организация более сильных лицевых связей избавляет от паразитной полосы пропускания на удвоении средней частоты.

Расчет и оптимизация характеристик фильтров, входящих в состав разрабатываемого УЧС проведены с помощью подпрограммы EM-Sight, входящей в специализированной САПР. Исходными данными для расчета характеристик фильтров служили геометрические и электрические параметры материала подложки и геометрические размеры токонесущих проводников. Для проектирования была выбрана керамика Du Pont Green Tape™ 951 с диэлектрической проницаемостью = 7.85, тангенсом угла диэлектрических потерь = 0.0045 (на частоте 10 ГГц), толщина керамики соответствует стандартному ряду: 42.5; 97; 140; 216 мкм.

Начальные значения параметров проводников рассчитывались по методу, изложенному в [2]. В расчете фильтров использовался Чебышевский прототип седьмого порядка с величиной пульсации 0.1 дБ

Критериями для оптимизации характеристик фильтров являлись следующие параметры:

- коэффициент затухания в полосе пропускания – не ниже -3дБ
- коэффициент затухания в полосе заграждение – не выше -30дБ
- коэффициент стоячей волны в полосе пропускания – не выше 1.5

После процесса оптимизации были получены следующие параметры фильтров (таблица 1)

*Таблица 1
Параметры фильтров после оптимизации*

Фильтр (полоса пропускания, ГГц)	L длина области связи, мм	h толщина диэлектрика, мм	W ширина токонесущего проводника, мм
F1 (3.8-5.3)	5.50	h1=0.355	W1=0.23
F2 (5.2-7.2)	4.00	h2=0.085	W2=0.25
F3 (7.0-9.8)	2.85	h3=0.333	W3=0.69
F4 (9.8-13.7)	1.90	h4=0.787 h5=0.882	W4=0.40

Для соединения фильтра с коммутирующим устройством были сформированы межслойные переходы (рис. 2). Для того, что бы они не оказывали влияние на характеристики фильтров, были рассчитаны параметры перехода, соответствующие 50-омной линии: диаметр отверстия 0.5 мм, диаметр проводника 230 мкм, ширина выходного токонесущего проводника 164 мкм.

Для осуществления коммутации между фильтрами выбраны коммутаторы НМС641 (рис. 3 а), которые расположены в крайних слоях диэлектрика (толщина 140 мкм).

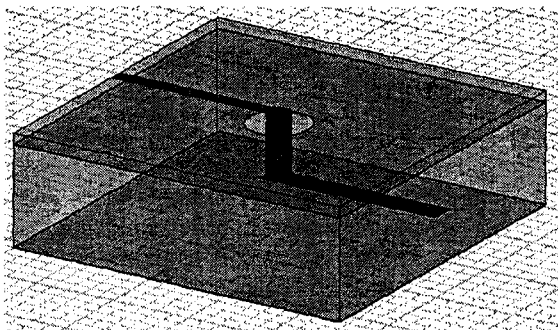
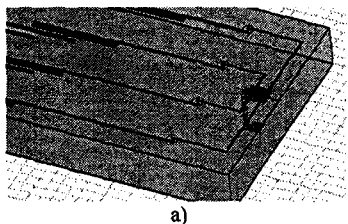
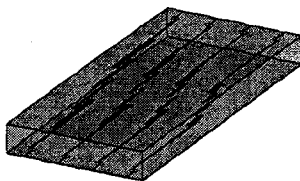


Рис. 2 – Модель межслотного перехода

Технология LTCC предполагает выполнение топологий всех фильтров на одной подложке, что приведет к взаимному влиянию соседних фильтров на характеристики друг друга. Чтобы исключить это влияние фильтры располагаются на расстоянии 5 мм друг от друга, что позволяет добиться развязки в пределах 40 дБ. Таким образом габариты всего разработанного устройства составляют: 38.8 x 20 x 4.28 мм (рис. 3 б).



а)



б)

Рис. 3 – а) вариант коммутации, используемый в УЧС; б) модель УЧС

Литература:

- [1] Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / Д.Л. Матгей, Л. Янг, Е.М.Т. Джонс.; Под ред. Л.В. Алексеева и Ф.В. Кушнира. – М.: Связь, 1971. – т.1
- [2] Конструирование экранов и СВЧ-устройств: Учебник для вузов / А.М. Чернушенко, Б.В. Петров, Л.Г. Малорацкий и др.; Под ред. А.М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1990. – 352с.: ил.
- [3] Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / С.И. Бахарев, В.И. Вольман, Ю.Н. Либ и др.; Под ред. В. И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328с., ил.

Принципы построения антенных систем с цифровым формированием ДН КВ диапазона

П.В. Горлев (ОАО «ОНИИП»)

Рассматриваются принципы построения антенных систем с цифровым формированием ДН. Обсуждаются преимущества и недостатки различных способов формирования ДН.

Ключевые слова: антенная решетка, цифровое формирование ДН.

Антенная система – новый класс интегрированных антенно-приемных комплексов, отличительной особенностью которых является использование цифровых (нелинейных) элементов в тракте обработки сигнала. Антенные системы строятся на основе антенных решеток различной конфигурации.

Наибольшее распространение получили:

- линейные антенные решетки (ЛАР);
- плоские антенные решетки (ПЛАР, гексагональные ПЛАР);
- круговые антенные решетки (КАР).

Чаще всего в КВ диапазоне в качестве антенных элементов применяются [1] (рис. 1):

- активная вибраторная антенна АВА (рис. 1, а);
- активная рамочная антенна АРА (рис. 1, б);
- активная двухрамочная антенна АРА-2 (рис. 1, в).

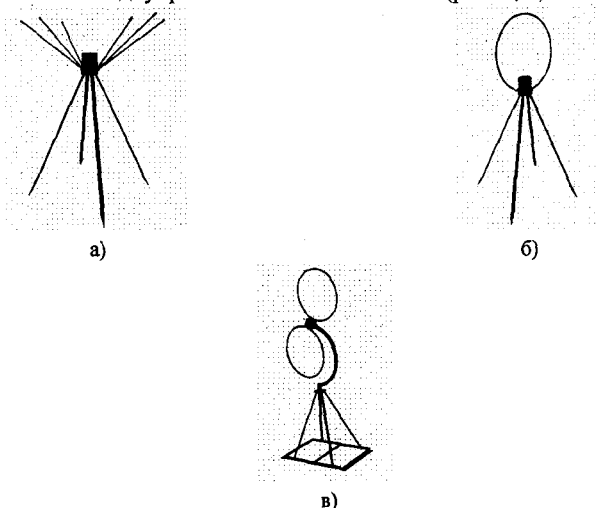


Рис. 1. Типы применяемых антенн в КВ диапазоне.

Большинство находящихся в эксплуатации КВ антенных комплексов (АК) характеризуется [3]:

- постоянством положения диаграммы направленности (всера диаграмм направленностей) в азимутальном направлении (азимутальной плоскости);
- наличием нескольких ДН в угломестной плоскости, каждая из которых формируется на выходе отдельного диаграммообразующего устройства (ДОУ), подключаемого ко входам РПУ не оперативно. При этом всем АК – фазиремым антенным решеткам (ФАР) присущи недостатки:
- низкая помехоустойчивость антенных трактов, обусловленная наличием в составе антенных элементов (АЭ) широкополосных маломощных антенных усилителей;
- зависимость значения ширины диаграммы направленности от частоты;
- появление значительного количества дифракционных лепестков в ДН с увеличением частоты принимаемого сигнала при выбранной конфигурации АК.

ДН плоской решетки с расположением одинаково возбужденных излучателей в узлах прямоугольной координатной сетки выражается [2] формулой:

$$F(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi) \frac{\sin \left[\frac{1}{2} k d_x N_x (\cos \theta \sin \varphi - \cos \theta_0 \sin \varphi_0) \right] \times \sin \left[\frac{1}{2} k d_y N_y (\sin \varphi - \sin \varphi_0) \right]}{N_x \sin \left[\frac{1}{2} k d_x (\cos \theta \sin \varphi - \cos \theta_0 \sin \varphi_0) \right] \times N_y \sin \left[\frac{1}{2} k d_y (\sin \varphi - \sin \varphi_0) \right]}$$

где θ и φ — углы сферической системы координат;

N_x , d_x и N_y , d_y — число и шаг излучателей по строке и столбцу, соответственно;

θ_0 и φ_0 — направление главного максимума ДН;

k — волновое число.

Величины $\psi_x = k d_x \cos \theta_0 \sin \varphi_0$ и $\psi_y = k d_y \sin \theta_0$ соответствуют прогрессивному набегу фаз между излучателями по строке и столбцу соответственно. Если эти параметры сделать управляемыми, то решетка станет фазированной и будет обеспечивать немеханический обзор пространства.

В неадаптивных решетках обычно применяется синфазное сложение принятых каждым излучателем сигналов с заданного направления в пространстве. Сложение и фазирование осуществляется с помощью сумматоров и линий задержки, выполненных на элементах фидерного тракта.

В связи с развитием цифровой обработки сигналов, обусловленной появлением быстродействующей элементной базой (АЦП, ЦАП, квадратурные преобразователи, сигнальные процессоры, программируемые интегральные схемы и т.д.) появляется принципиальная возможность формирования диаграммы направленности цифровыми методами.

Формирование ДН из числовой последовательности возможно принципиально провести тремя способами [2]:

- прямое сложение значений сигналов, принятых излучателями решетки и отквантованных в различные моменты времени;
- сложение вычисленных значений сигналов в моменты времени, обеспечивающие квазинепрерывное перемещение ДН в пространстве;
- введение в числовые значения излучателей фазовых сдвигов с последующим сложением получаемых значений.

Формирование ДН прямым сложением числовой последовательности показан на рис. 2.

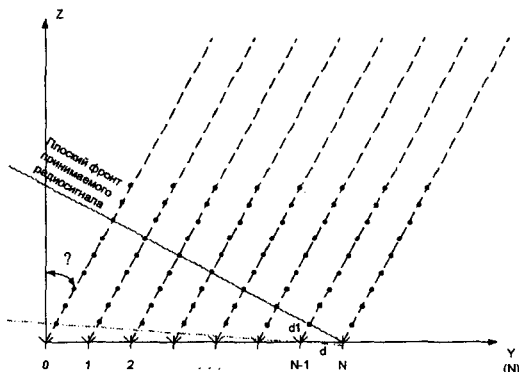


Рис. 2. Прямое сложение значений сигналов.

При прямом сложении, для того, чтобы сформировать требуемую ДН, для минимизации ошибок, частота дискретизации должна быть как минимум в 5 раз больше частоты сигнала. Учитывая, что в КВ диапазоне максимальная частота составляет 30 МГц, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) должен работать на частоте 150 МГц. Учитывая, что в КВ диапазоне применяются, для обеспечения требуемого динамического диапазона, 14-битные и более АЦП, это приводит к требованию к пропускной способности каналов связи не менее 2.1 Гбит/с. Так как в антенные решетки состоят из нескольких антенных элементов, то данную пропускную способность надо умножить на количество применяемых антенных элементов. Так для 16-ти элементной решетки необходимая пропускная способность составит 33.6 Гбит/с, а такие пропускные способности пока трудно достижимы.

Способ сложения вычисленных значений пока мало изучен, но по некоторым оценкам он уже сейчас может быть реализован на современной элементной базе.

Наиболее применяемым сейчас является метод введения в числовые значения излучателей фазовых сдвигов с последующим сложением получаемых значений. Одним из главных преимуществ данного метода является простота

реализации, но помимо преимуществ, есть и недостатки, самым большим из которых является относительная узкополосность, обусловленная изменением направления приема от частоты сигнала. В связи с этим по этому методу можно строить антенные решетки для приема узкополосных сигналов. Один из способов построения такой системы упрощенно показан на рисунке 3.

На рисунке 3 показана система построения одноканального приемного центра, для реализации многоканального приема необходимо увеличить число приемников, подключаемых к антенному элементу.

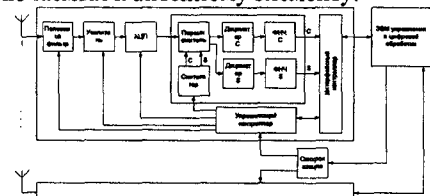


Рис. 3. Система цифрового формирования ДН.

Как видно из рисунка, данная система состоит из аналоговой части, которая включает в себя полосовой фильтр и усилитель, АЦП, квадратурного преобразователя, состоящего из синтезатора синусных и косинусных сигналов, перемножителя, дециматора, производящего понижение частоты дискретизации и фильтра нижних частот. Также в состав системы входит управляющий и интерфейсный контроллеры. Управляющий контроллер служит для управления всеми частями устройства, в том числе и для задания фазового сдвига, получаемого установкой начальной фазы синтезатора. Интерфейсный контроллер служит для передачи принятых данных на ЭВМ управления и цифровой обработки, на которой проводится суммирование сигналов, принятых со всех антенных элементов.

Литература:

- [1] Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.П. и др. Коротковолновые антенны. – М.: Радио и связь, 1985. – 536с.
- [2] Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. – М.:Радиотехника, 2004. – 488 с.
- [3] Левченко В.И. Состояние и перспективы развития технических средств для дальней коротковолновой радиосвязи / - Омск: ФГУП «Омский НИИ приборостроения». Научно – технич. Сборник «Техника радиосвязи». – 2003. – Вып.8 – С.3-12.

Особенности перспективных методов передачи данных в Mesh сетях

В.С. Еремин, (аспирант ОмГТУ, ОАО «ОНИИП»)

П.В. Прохоров, к.т.н. (ОАО «ОНИИП»)

В докладе делается обзор существующих решений по созданию сетей на базе технологии Wi-Fi Mesh и некоторых открытых протоколов маршрутизации для самоорганизующихся сетей. Описываются способы маршрутизации в беспроводных Mesh сетях и возможные направления оптимизации передачи данных.

Ключевые слова: Wi-Fi, Mesh сеть, маршрутизация, сетевой протокол.

Mesh сеть – совокупность узлов, объединённых беспроводными каналами связи в компьютерную сеть. Точное и всеобъемлющее определение данной технологии достаточно тяжело привести в связи с разными реализациями данной технологии у различных разработчиков.

Mesh сеть характеризуется следующими особенностями:

- общая среда передачи данных;
- все узлы сети изначально равноправны;
- сеть является самоорганизующейся;
- каждый узел играет роль маршрутизатора;
- топология сети может меняться;
- к сети могут подключаться новые узлы.

Любой узел беспроводной сети передачи данных обладает как минимум одним беспроводным сетевым интерфейсом. Кроме того, узел может иметь интерфейс связи с проводной или иной сетью, либо дополнительные радиointерфейсы, работающие как в данном, так и в ином частотном диапазоне.

Формирование таблиц маршрутизации и поиск маршрута является задачей, для решения которой применяются алгоритмы поиска кратчайшего пути. Решение о выборе маршрута принимается на основе одного из критериев минимальной стоимости прохода по пути. Если выбирается маршрут с минимальным количеством ретрансляционных участков, то каждому ребру, соответствующему ретрансляционному участку, назначается единичный вес. При расчете необходимо учитывать пропускную способность каждого ретрансляционного участка и всего маршрута от начала до конца. Кроме того, для голосовой и видео связи необходимо учитывать время передачи пакета через сеть.

Принцип передачи сообщений в беспроводных Mesh сетях основывается на многократной ретрансляции сетевого пакета вплоть до достижения пакетом получателя [4]. Маршрутизация трафика включает в себя непосредственную ретрансляцию сообщений, а также задачу поиска оптимального пути следования пакета.

Все протоколы маршрутизации разделяются на две части: проактивные (pro-active) и реактивные (re-active). Проактивные протоколы выгодно отличаются от реактивных тем, что информация о топологии сети аккумулируется заблаговременно до отправки сетевого пакета. Реактивные протоколы маршрутизации начинают решать задачу поиска пути следования пакета в момент, когда отправить сетевой пакет. Это приводит к большим задержкам при отправке пакетов. Таким образом, реактивные протоколы не могут быть использованы в высокоподвижных беспроводных сетях в виду быстрого изменения топологии. Среди реактивных протоколов присутствуют: AODV (Ad-Hoc On-Demand, Distance Vector) [5], HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol), TORA (Temporary ordered routing algorithm), DSR (Dynamic Source Routing).

Протоколы беспроводной маршрутизации используют различные методики вычисления пути следования пакета [6]: дистанционно-векторный и отслеживание «состояний линий». В случае беспроводной сети «линией» является наличие двусторонней связи между узлами. Данный метод достигает наилучших результатов в беспроводных сетях. Данный метод используется в OLSR. Дистанционно-векторная маршрутизация основывается на вычислении маршрута по таблицам, получаемым от смежных узлов. Проблема счёта до бесконечности [5] нивелирует все преимущества данного протокола в беспроводных сетях. Этот механизм поиска пути используется в AODV.

Таким образом, на данный момент времени самым успешным протоколом маршрутизации является OLSR [1,3]. OLSR имеет ряд особенностей, таких как MPR [2], выгодно отличающих его от остальных протоколов маршрутизации. Однако в протоколе реализован механизм hop-by-hop маршрутизации. При использовании данного механизма маршрутизации каждый узел-получатель заново рассчитывает маршрут следования пакета и направляет пакет следующему промежуточному узлу. Это повторяется до тех пор, пока пакет не достигнет получателя. Этот механизм исключает возможность одновременного задействования нескольких путей следования пакета. Рассмотрим ситуацию, когда узлу А необходимо отправить пакеты узлу В либо через узел В, либо через узел Д. Маршрут через В является более оптимальным, однако оба маршрута являются достаточно загруженными. Совместное использование этих двух маршрутов позволяет обеспечить пропускную способность требуемую для пересылки пакетов от узла А к В. В данной ситуации протокол OLSR не может обеспечить «расщепления» маршрута следования пакетов в виду того, что каждый промежуточный узел, получающий пакет самостоятельно вычисляет дальнейшего получателя пакета. Это приведет к тому, что промежуточный узел Д адресует полученный пакет узлу В. Таким образом, реализовать несколько маршрутов в рамках данного протокола невозможно из-за используемого механизма маршрутизации.

Необходимость в нескольких актуальных маршрутах возникает, когда необходимо организовать канал передачи данных высокой надежности. Для

сетей требующих надежности соединения недопустимы разрывы связи. Избежать их можно, используя резервные маршруты передачи данных. Данные недостатки разрешаются использованием маршрутизации от источника. Маршрутизация от источника означает, что отправитель сообщения определяет путь следования пакета и прикрепляет к пакету информацию об этом пути. Промежуточный узел не рассчитывает заново маршрут следования пакета, а лишь пересылает пакет следующему узлу, указанному в прикрепленной информации. Данный подход позволяет задать маршрут следования пакета в соответствии с критериями узла-отправителя и исключить возможные ситуации перенаправления пакета по другому пути.

Протокол Wmesh

В связи с тем, что существующие решения в области Mesh сетей несовершенны, предлагается создать собственный протокол маршрутизации. Полное описание данного протокола выходит за рамки данного доклада, поэтому ограничимся лишь описанием его основных характеристик.

Создаваемый протокол маршрутизации в беспроводной сети будет являться проактивным протоколом с отслеживанием состояний линий и маршрутизацией от источника. Это позволяет эффективно использовать протокол в беспроводных сетях с быстроменяющейся топологией. Кроме того, использование маршрутизации от источника способно обеспечить низкие потери передачи, либо достигнуть максимально возможной скорости передачи данных в условиях сильной загрузки сети.

В качестве метода решения данной задачи выбран механизм маршрутизации по меткам, присваиваемым узлам, входящим в сеть.

Текущая версия протокола беспроводной связи Wmesh была реализована для среды моделирования NS-3 с модулем визуализации Pyviz.

В текущей версии протокола Wmesh поддерживает следующие возможности и функции:

- Реализован промежуточный уровень (2,5 Layer) передачи данных – Wmesh, который включает себя служебные данные о маршруте следования пакета и позволяет передавать пакеты в беспроводной Wi-Fi сети.
- Пересылка IP-пакета на основании списка меток, которые содержит Wmesh-уровень.
- Возможность *доставки* одного сообщения нескольким адресатам, т.е. создания *multicast* рассылки сообщений.
- Возможность *доставки* сообщения резервным маршрутом. Позволяет избежать длительных задержек при разрыве маршрута следования пакета
- Механизм *игнорирования* дублирующих и эхо пакетов. Позволяет избежать повторных передач пакетов и, как следствие, снизить нагрузку на сеть.

- Механизм *поиска* оптимального маршрута для unicast сообщений.
- Механизм обмена и обработки HELLO-пакетов.

Разработка и тестирование:

- Алгоритм обмена информацией о топологии сети
- Протокол обмена информацией о качестве связи между отдельными узлами
- Протокол *распределения* уникальных идентификаторов узлов в распределенной сети
- Методы *анализа* качества связи между узлами сети
- Алгоритм поиска оптимального пути рассылки многоадресного (multicast) сообщения

Заключение

Использование Mesh сетей позволяет снизить необходимую мощность передающего устройства за счет использования промежуточных узлов передачи данных.

Развертывание Mesh сети может происходить в условиях разрушенной либо отсутствующей инфраструктуры. Например, в случае выхода из строя действующих объектов связи при аварии или ЧС для развертывания связи необходимо лишь распределить узлы по требуемой зоне покрытия сети.

Для развертывания Mesh сети требуется короткий промежуток времени. Узлы сети не требуют инфраструктуры связи, не смотря на это, Mesh сеть способна покрывать значительную территорию.

При развертывании узлы Mesh сети самостоятельно способны определять соседние узлы и устанавливать с ними связь. Таким образом, развертывание и последующее использование не требует вмешательства специалиста.

На данный момент не существует протокола взаимодействия узлов, который мог бы раскрыть все преимущества Mesh сетей. Уже разработанные протоколы не позволяют использовать одновременно несколько маршрутов связи, что снижает общую надежность сети. По этой же причине невозможно увеличить пропускную способность канала связи.

Существующие протоколы Mesh сетей слабо соответствуют требованиям управляемости и безопасности. Открытые протоколы передачи данных не предполагают защиты передаваемых данных, а проприетарные протоколы не документированы. Это ещё раз говорит о несостоятельности существующих решений Mesh сетей и о необходимости исследований в этом направлении.

Литература

[1] Clausen T. (ed.) and Jacquet P. (ed.), Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), RFC3626 // Internet Engineering Task Force (IETF). October 2003.

- [2] IEEE. 802.11s Terms and Definitions, doc: IEEE 802.11-08/0895r0. July 2008.
- [3] Tonnesen A. Impementing and Extending the Optimized Link State Routing Protocol. – <http://www.olsr.org/>
- [4] Samir R. Das. Wireless Mesh Networking. – <http://www.cs.sunysb.edu/>
- [5] Perkins C. E., Belding-Royer E. M., Das S. Ad Hoc on Demand Distance Vector (AODV) Routing // RFC 3561, Internet Engineering Task Force (IETF). July 2003.
- [6] Вишнеvский В., Гузаков Н., Лаконцев Д. Mesh сети стандарта IEEE 802.11s: протоколы маршрутизации // Первая миля. 2009. № 1. С. 16-21.

Кварцевые элементы термодатчиков, полученные инверсией кристаллической структуры

С. В. Ермоленко (ОАО «ОНИИП», ОмГУ им. Ф.М. Достоевского),
А. М. Ярош (ОАО «ОНИИП»)

В статье показана возможность изготовления термодатчиков на основе кварцевых резонаторов полученных инверсией кристаллического элемента АТ-среза.

Ключевые слова: кварц, АТ-срез, инверсия, двойникование, термодатчик.

В настоящее время требуется большое количество разнообразных датчиков, основанных на различных физических свойствах тех или иных веществ и материалов, для измерения всевозможных физических параметров. Так на ряду с датчиками температуры основанными на изменении электрического сопротивления материалов под действием температуры, имеются датчики которые преобразуют данные температуры в изменение частоты. Эти датчики основаны на изменении частоты пьезоэлектрического резонатора от температуры. Так на рис. 1 представлено семейство кривых температурно-частотной характеристики АТ-среза.

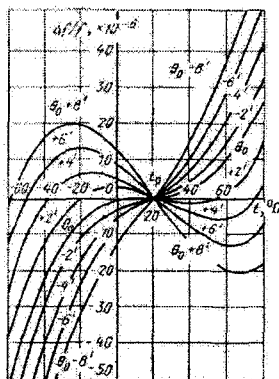


Рис. 1 Семейство ТЧХ АТ-среза

Выбирая соответствующую ориентацию среза пьезоэлектрического элемента относительно кристаллографических осей, можно изменять его температурно-частотную характеристику (ТЧХ), которая в общем случае является нелинейной функцией температуры и описывается рядом следующего вида:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \sum_{n=1}^m \delta_f^n (T - T_0)^n,$$

где $\delta_f^T = 1/(n!f_0)(\partial_f^n / \partial T^n)_{T_0}$ – температурный коэффициент частоты, T и T_0 – калибровочное и опорное значение температуры; f_0 – резонансная частота при температуре T_0 [1,2,3,4,5]. В широком диапазоне температур ТЧХ кварцевого резонатора с достаточной точностью аппроксимируется полиномом третьей степени. Очевидно, для использования более удобны пьезоэлектрические резонаторы с линейной ТЧХ, либо с линейным рабочим участком.

Кварц имеет несколько фазовых состояний, имеющие различные свойства. В пьезокварцевом производстве применяют низкотемпературную α -фазу кварца, которая обладает пьезоэлектрическим эффектом. При нагревании кварца до температуры фазового перехода (573°C) происходит перестройка кристаллической решётки из тригональной в гексагональную. При охлаждении происходит полиморфный переход в низкотемпературную тригональную модификацию. В результате различные тригональные участки получаются, повернуты друг относительно друга на 180° относительно оптической оси Z , что соответствует дофинеяскому закону двойникования. Кроме того, известно, что тонкие пластины синтетического кварца испытывают полную инверсию кристаллической структуры при фазовом переходе с поворотом элементарной гексагональной ячейки на 180° вокруг оси Z [6]. В нашей работе это явление использовано для получения кварцевых элементов термодатчиков.

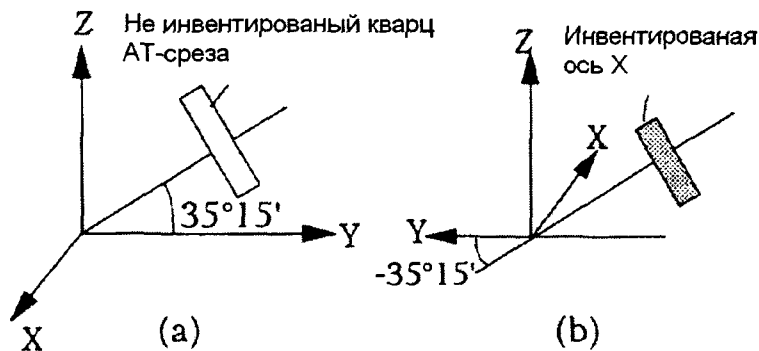


Рис. 2 Инверсия оси X [7]

Резонаторы изготавливали из пластин синтетического кварца AT-среза, которые были подвергнуты высокотемпературному отжигу в печи при температуре фазового перехода. В результате у нас получился кристаллический элемент инвертированного AT-среза с частотой в 1,5 раза выше исходной частоты, т.к. изменилась ориентация, а, следовательно, и частотный коэффициент. Далее было произведено напыление электродов из серебра с подслоем нихрома на пластины, т.е. конструкция классического резонатора. Пластины смонтированы в корпусах НС-45, которые герметизированы на форвакууме.

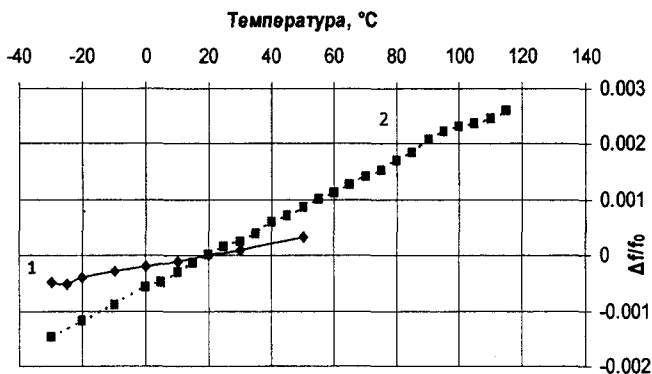


Рис. 3 Температурно-частотная характеристика резонаторов из инвертированного АТ-среза: кривая 1-20 МГц, кривая 2-30 МГц

Таким образом, изготовлены кварцевые резонаторы с углом среза -35° , которые имеют линейную ТЧХ в области температур от -30 до $+120$ °C. Чувствительность полученных резонаторов(термодатчиков) на 30 МГц 30 ppm/°C, для резонаторов на 20 МГц 10 ppm/°C.

Литература:

- [1] Глюкман Л.И. «Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы», М, Радио и связь, 1981, 232 стр.
- [2] Дикиджи А.Н. и др. «Справочник по кварцевым резонаторам», М, Связь, 1978, 288 стр.
- [3] У. Кэди «Пьезоэлектричество и его практические применения», М, издательство иностранной литературы, 1949, 718 стр.
- [4] Малов В.В. «Пьезорезонансные датчики», М, ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1989, 270 стр.
- [5] Смагин А.Г. «Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы», М, «Энергия», 1970.
- [6] Патент №2169986 РФ. Способ изготовления кварцевых резонаторов БТ-среза / Алексеев П.Д., Кибирев С.Н., Ресненко О.А., Сивков Б.В., Ярош АМ. – Приоритет от 07.07.1999.
- [7] T. UNO, «Temperature Compensation of Thickness Shear Mode Resonators Formed on Artificial Twinned Quartz Plates», IEEE INTERNATIONAL FREQUENCY CONTROL SYMPOSIUM, 1996

Аппаратно-программный комплекс кардиомониторинга на основе устройства мобильной связи

П.Н. Киналь (ОмГТУ), Д.Н. Клыпин (ОмГТУ)

Особенностью разрабатываемого комплекса кардиомониторинга является использование в качестве узлов кардиомонитора стандартных узлов устройства мобильной связи. Основными требованиями к УМС являются наличие порта аналогового входа и возможность исполнения приложения пользователя.

Для решения поставленной задачи предлагается дополнить УМС такими узлами кардиомонитора, как электродное устройство, состоящее из 3-х электродов ЭКГ, и усилитель биопотенциалов, а также создать специализированную программу регистрации и анализа кардиосигнала.

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, кардиомониторинг, электрокардиограмма, отведение, устройство мобильной связи.

Актуальность разработки высокоэффективной медицинской техники и технологий для пациентов с заболеваниями сердца подчеркнул академик Е.И. Чазов на Национальном конгрессе кардиологов в 2009 г. «...несмотря на появление новых лечебно-диагностических методов, эффективность лечения сердечно-сосудистых заболеваний не только не увеличивается, но, судя по росту больничной летальности, даже уменьшается» [2].

Среди причин смерти трудоспособного населения сердечно-сосудистые заболевания в структуре смертности уступают первое место только так называемым "внешним причинам" (травмы, отравления, убийства и т.п.). Ежегодно в России от болезней сердца и сосудов умирает около 1,3 млн человек – это более 56% от общего числа умерших.

В настоящее время в нашей стране все больший вес в улучшении качества оказания медицинской помощи населению придается развитию догоспитального звена здравоохранения – поликлинической службе, и, в частности, дистанционным методам анализа и диагностики заболеваний.

Разрабатываемый аппаратно-программный комплекс кардиомониторинга (далее – АПКК) относится к средствам дистанционной амбулаторной регистрации ЭКГ непосредственно пациентом и дальнейшей передачи данных в центр кардиотелеметрии для детального анализа. Основная задача разработки – создание диагностического прибора полнофункционального кардиомониторинга, доступного широким слоям населения и обладающего дополнительными функциями оперативного анализа регистрируемой электрокардиограммы (ЭКГ) для своевременного выявления опасного для здоровья состояния и оповещения об этом человека.

В настоящее время полнофункциональных аналогов предлагаемой к разработке продукции на внутреннем и внешнем рынках нет. Имеются только

отдельные приборы, в непригодном для использования в составе комплекса виде, с недостаточным набором свойств и функций.

В продаже имеются малогабаритные «ручные» электрокардиографы, осуществляющие регистрацию ЭКГ по 1 - 3 отведениям [5, 6] с отображением результатов на встроенном дисплее и запоминанием нескольких измерений. Стоимость таких устройств соизмерима со стоимостью сотового телефона средней ценовой категории (6...10 тыс. рублей). Недостатком таких устройств является невозможность передачи измеренной ЭКГ в центр кардиотелеметрии.

В настоящее время в Санкт-Петербурге фирмой ООО «Медицинские телеметрические системы» совместно с Центральной медико-санитарной частью №122 и Покровской больницей разворачивается сеть кардиотелеметрии. Пациенту выдается «кардиопейджер» - устройство, осуществляющие регистрацию ЭКГ с дальнейшей передачей данных в центр кардиотелеметрии по звуковому каналу любого телефона [1]. Недостатком таких устройств является отсутствие средств оперативного анализа ЭКГ (дисплея, индикаторов аритмии и т.п.).

Общим недостатком всех рассмотренных ранее устройств является необходимость приобретения отдельного достаточно дорогого прибора.

Особенностью разрабатываемого аппаратно-программного комплекса кардиомониторинга является использование в качестве известных узлов кардиомонитора стандартных узлов устройства мобильной связи (УМС). УМС может представлять собой сотовый телефон, коммуникатор, смартфон, терминал транковой или спутниковой связи и т.п. Основные требования, предъявляемые к УМС – наличие порта аналогового входа и возможность исполнения приложения пользователя.

В качестве порта аналогового входа УМС может выступать микрофонный вход гарнитуры, имеющийся у большинства УМС. Для большинства выпускаемых в настоящее время УМС с сотовой связью имеется возможность создания и исполнения приложения пользователя на определенном языке программирования, например, JAVA [3].

Стандартные узлы УМС, которые могут использоваться как узлы кардиомонитора:

- порт аналогового входа УМС может использоваться как аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) кардиосигнала;
- энергонезависимая память УМС (встроенная или в виде карты памяти) может служить устройством хранения данных кардиомониторинга;
- дисплей УМС может служить для отображения: электрокардиограммы (ЭКГ) в графическом виде, служебной информации (номер ЭКГ отведения, время измерения), тревожной информации (выхода параметров ЭКГ за пределы нормы) и т.д.;
- динамик УМС может служить для индикации начала и конца процедуры регистрации ЭКГ, а также для тревожного оповещения аналогично предыдущему пункту;

- аккумулятор УМС может служить для длительного электропитания всех узлов кардиомонитора;

- контроллер УМС выполняет обработку и анализ кардиосигнала по программе пользователя, запись в энергонезависимую память информации и передачу данных в центр кардиотелеметрии для детального анализа.

Для решения поставленной задачи предлагается дополнить УМС такими узлами кардиомонитора, как электродное устройство, состоящее из 3-х электродов ЭКГ, и усилитель биопотенциалов, а также создать специализированную программу регистрации и анализа кардиосигнала.

В первом конструктивном исполнении АПКК электроды ЭКГ могут представлять собой наклейки на корпус прибора, выполненные из материала с высокой электропроводностью, например, из металла или проводящего пластика. Усилитель биопотенциалов при этом представляет собой отдельную плату, размещаемую в корпусе УМС.

Во втором конструктивном исполнении АПКК электродное устройство и усилитель биопотенциалов могут быть выполнены в виде отдельной гарнитуры со стандартным 3,5 мм штекером для УМС. К входу усилителя биопотенциалов подключены провода с клипсами, надеваемыми на стандартные ЭКГ электроды. Выход усилителя биопотенциалов подключен к микрофонному входу УМС, питание усилителя подается по проводам гарнитуры.

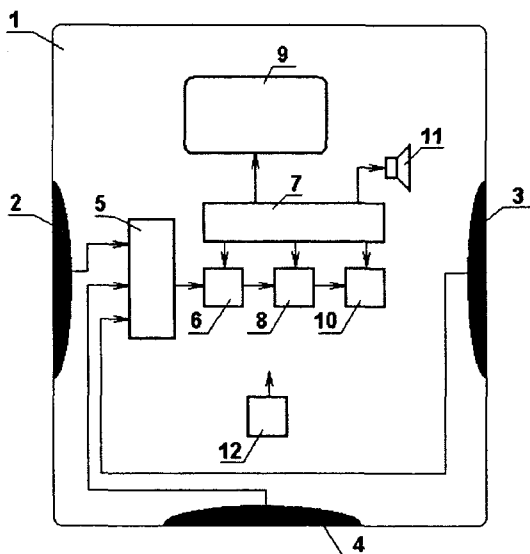


Рис. 1 Схема структурная АПКК

Как видно из рис. 1, комплекс содержит: корпус 1, электроды ЭКГ 2, 3, 4, усилитель биопотенциалов 5, порт ввода аналогового сигнала 6, контроллер 7, энергонезависимую память 8, дисплей 9, модем 10, звуковой излучатель 11, аккумулятор 12. Черным цветом показаны возможные зоны размещения электродов ЭКГ.

Комплекс работает следующим образом. Предварительно в комплекс по проводному или беспроводному интерфейсу загружается специализированное приложение пользователя для регистрации и анализа ЭКГ. Перед началом любого измерения путем выбора из меню это приложение запускается. Процесс регистрации ЭКГ индицируется на дисплее.

Для измерения I отведения ЭКГ (L - R) человек берет прибор в правую руку так, чтобы пальцы и ладонь плотно охватывали электроды ЭКГ 2 и 3, и прикасается электродом 4 к точке стандартного отведения L [4] - к ладони левой руки.

Для измерения II отведения ЭКГ (F - R) человек берет прибор в правую руку так, чтобы пальцы и ладонь плотно охватывали электроды ЭКГ 2 и 3, и прикасается электродом 4 к точке стандартного отведения F - к лодыжке левой ноги.

Для измерения III отведения ЭКГ (F - L) человек берет прибор в левую руку так, чтобы пальцы и ладонь плотно охватывали электроды ЭКГ 2 и 3, и прикасается электродом 4 к точке стандартного отведения F - к лодыжке левой ноги.

Записанные данные представляют собой файл, хранящийся в энергонезависимой памяти. В дальнейшем человек может передать этот файл любым известным способом передачи данных, соответствующим типу устройства мобильной связи (например, по каналу GSM-факс, GPRS, EDGE, CDMA, TETRA и т.п.).

Промышленная осуществимость предлагаемого решения обосновывается тем, что в нем используются стандартные узлы УМС по своему прямому функциональному назначению.

На решения, используемые в данной разработке, подана заявка в ФИПС на регистрацию патента.

Литература:

- [1] Использование кардиопейджера. <http://telmed.ru/index.php?id=2>
- [2] Комсомольская правда, 12-18 июня 2009.
- [3] Пишем софт для телефона. <http://www.mobilab.ru/articles/88/>
- [4] Старшов А.М., Смирнов И.В. ЭКГ для профессионалов. Методика и техника электрокардиографического исследования. – М.: Познавательная книга плюс, 2002. – с.16
- [5] Handheld ECG monitor FP-180. <http://www.favoriteplus.com/easy-ecg-handheld-monitor-fp180.php>.
- [6] Handheld ECG monitor FP-RMH. <http://www.favoriteplus.com/readmyheart-handheld-ecg-ekg-monitor-fp-rmh.php>.

Температурные зависимости радиофизических характеристики почв

*С.В. Кривальцевич, к.ф.-м.н. (ОАО «ОНИИП», ОмГУ им. Ф.М. Достоевского),
В.В. Подгорецкий (ОАО «ОНИИП»)*

В докладе рассматриваются результаты измерений радиофизических характеристик трех типов почв в широком температурном диапазоне. Представлены температурные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) почв разного гранулометрического состава, в том числе с нефтяными загрязнениями, дан анализ полученных результатов.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, температура, зависимость.

Для решения обратной радиометрической задачи – восстановления гидрофизических характеристик почв по данным дистанционного радиометрического и радиолокационного зондирования – необходима подробная база диэлько-влажностных характеристик этих почв, которая позволила бы построить их радиофизическую модель [1]. Недостаточно исследованными являются температурные зависимости КДП почв. Наиболее интересным является диапазон температур которые в естественных условиях чаще всего имеют почвы (от -40 до $+50$ °С). Следует отметить, что увеличение объема данных КДП почв, позволит уточнить их радиофизические модели, что в свою очередь позволит повысить точность дешифрирования данных дистанционного зондирования.

Учет температурных зависимостей радиофизических характеристик почв позволит повысить точность определения их влажности, степени загрязнения, засоленности и других физико-химических свойств.

Целью нашей работы было исследование температурных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) различных типов почвогрунтов. Для этого была разработана и изготовлена система температурной стабилизации почвенных образцов. Данная система представляет собой отрезок волноводной линии, помещенный в металлический массив с установленными на нём термоэлектрическими модулями (элементами Пельтье) и окруженный температурными датчиками (рис. 1). Также в систему входит блок управления, в котором можно выделить цифровую часть на базе микроконтроллера (рис. 2) и силовую часть (рис. 3), в качестве которой была использована схема реверса полярности для управления термоэлектрическими модулями.

Более подробно разработанная экспериментальная установка описана в [3].

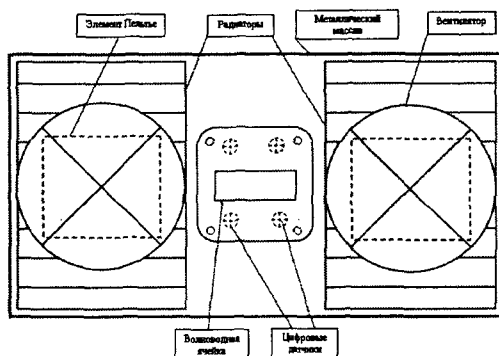


Рис. 1. Структурная схема волноводной измерительной ячейки.

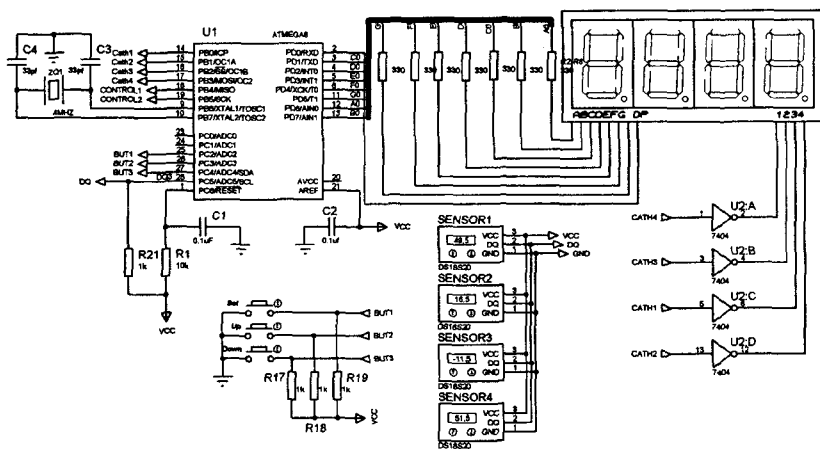


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема цифровой части блока управления.

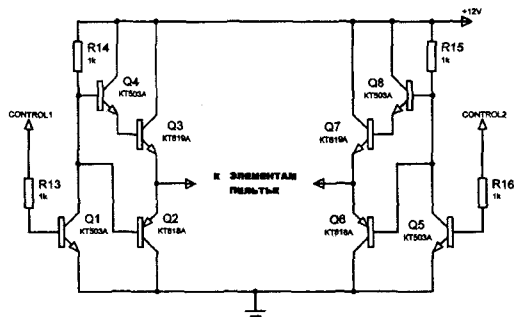


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема силовой части блока управления.

С помощью данной системы в диапазоне частот от 8200 до 10000 МГц были исследованы температурные зависимости трех видов почвогрунтов:

- мелкозернистый речной песок при влажности 12% (далее образец №1);
- суглинок с содержанием гумуса 6,6% при влажности 16% (образец №2);
- суглинок с содержанием гумуса 6,6% с добавлением товарной нефти в количестве 20% от массы сухого образца при влажностях 12%, 16% и 20% (образец №3).

Результаты измерений образца №1 на частотах 8200 МГц, 8800 МГц и 10000 МГц в температурном диапазоне от 6 °С до 45 °С приведены на рис. 4. Из данного графика можно заметить, что, во-первых, действительная часть КДП исследуемого образца незначительно увеличивается с ростом температуры; и, во-вторых, с ростом частоты указанная тенденция становится менее заметной. Данный факт также можно объяснить с помощью модели Дебая: с ростом температуры уменьшается время релаксации молекул воды, что было показано в [2]. Это, в свою очередь, и приводит к увеличению действительной части КДП влажного почвенного образца. На низких частотах преобладает температурная дисперсия времени релаксации, тогда как на высоких частотах ее влияние ослабевает. Похожее исследование описано в работе [4], где изучалось влияние засоленности на характер температурной зависимости почв, но преимущественно в отрицательной области температур. Результаты же исследования КДП в области положительных температур качественно совпадают с результатами, полученными в данной работе.

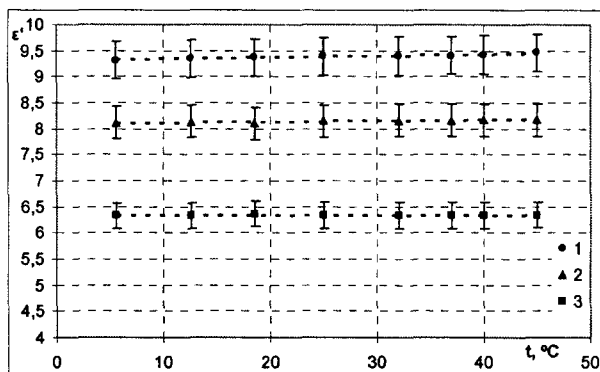


Рис. 4. График температурных зависимостей действительной части КДП образца №1 на частотах 1 – 8200 МГц, 2 – 8800 МГц и 3 – 10000 МГц

Результаты измерений образца №3 при объемных влажностях 12%, 16% и 20% на частоте 9200 МГц приведены на рис. 5.

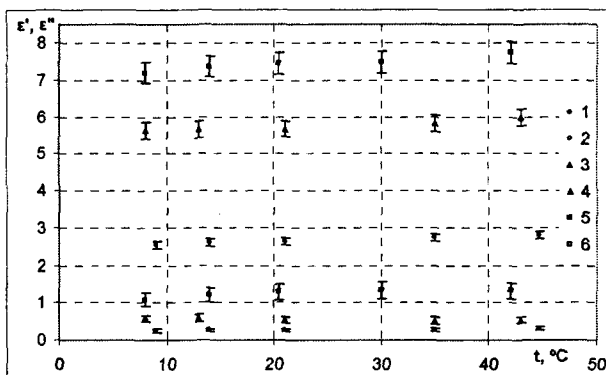


Рис. 5. График температурных зависимостей на частоте 9200 МГц действительной (1, 3, 5) и мнимой (2, 4, 6) частей КДП образца №2 при объемных влажностях 1, 2 – 12%; 3, 4 – 16%; 5, 6 – 20%.

Из приведенного графика можно сделать следующий вывод: температурное влияние на КДП почвы, загрязненной нефтью тем выше, чем выше содержание в ней влаги.

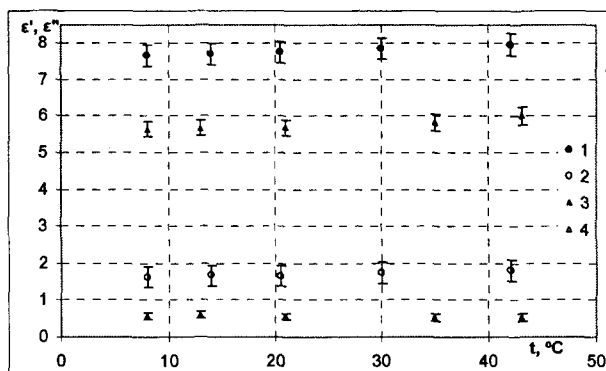


Рис. 6. График температурных зависимостей действительной (1, 3) и мнимой (2, 4) частей КДП образцов №2 и №3 на частоте 9200 МГц при объемной влажности 16%.

Результаты измерений образца №2 (незагрязненного суглинка с содержанием гумуса 6,6%) и образца №3 (загрязненного нефтью в количестве 20% от массы сухого образца) при влажности 16% приведены на рис. 6. Из данного графика видно, что нефть занижает значения КДП почвенных образцов. Данный результат согласуется с литературными данными [5] и

объясняется тем, что нефть, являясь компонентом смеси, имеющим низкую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon' \approx 2,25$), замещает компоненты почвы и воздух, снижая тем самым значение ДП всей смеси. Влияния нефтяных загрязнений на характер температурной зависимости выявлено не было.

Литература:

- [1] *Комаров С. А., Миронов В. Л.* Микроволновое зондирование почв. – Новосибирск: Научно-издательский центр СО РАН, 2000. – 289 с.
- [2] *Бобров П. П.* Экспериментальная проверка моделей комплексной диэлектрической проницаемости почв и связанной почвенной влаги / П. П. Бобров, Т. А. Беляева, А. П. Бобров, О. В. Галеев, В. И. Убогов // *Естественные науки и экология. Ежегодник.* – Омский Государственный Педагогический Университет. – 2002 г.
- [3] *Подгорецкий В.В.* Термостабилизирующий комплекс для измерения диэлектрической проницаемости почв в широком температурном диапазоне // II студенческая научно-практическая конференция «Приборостроение и информационные технологии» (11 декабря 2009 г.): тезисы докладов. – Омск: Омский НИИ приборостроения, 2010. – С.11-13.
- [4] *Ильин В. А.* Лабораторные исследования диэлектрической проницаемости мерзлых песчаных почв / В. А. Ильин, С. В. Слободчикова, В. С. Эткин // *Радиотехника и электроника.* – №6. – 1993 г. – С. 1036-1041.
- [5] *Мандрыгина В. Н.* Диэлектрическая проницаемость почв с различным содержанием гумуса и влияние на нее гидрофобных и гидрофильных загрязнителей : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.03. – Омск, 2004. – 165 с.

Создание беспроводных сенсорных сетей на основе технологии ZigBee

А.Б. Лысак (ОАО «ОНИИП», ОмГУ им. Ф.М. Достоевского)

Представлены основы построения самоорганизующихся самовосстанавливающихся сетей датчиков. Описываются базовые принципы, стандартизированные в IEEE 802.15.4 и документах ZigBee Alliance. Рассматриваются устройства, функционирующие в таких сетях.

Ключевые слова: сенсорные сети, ZigBee, протоколы связи

Беспроводные сенсорные сети представляют собой распределенную самоорганизующуюся систему датчиков для сбора, передачи и обработки информации. Основными целями организации таких систем, как правило, являются мониторинг и контроль состояния определенных физических параметров: температуры, влажности, освещенности. К достоинствам таких сетей, в первую очередь, можно отнести:

- возможность расположения в труднодоступных местах, где дорого, сложно, а иногда и невозможно использовать традиционные проводные решения;
- удобство развертывания и обслуживания системы, обеспечиваемые самоорганизацией устройств;
- надежность системы, самовосстановление которой подразумевает автоматическое использование альтернативных маршрутов доставки данных в случае выхода из строя какого-либо узла сети[1].

К технологии по которой будет организована подобная система предъявляются серьезные требования. В частности, если датчики расположены в труднодоступных местах, то необходимо использование автономных источников питания, что приводит к требованию низкого энергопотребления. Использование альтернативных маршрутов доставки данных предполагает построение сетей со сложной топологией. Специфическим требованиям к построению подобных сетей удовлетворяет специально созданный стандарт ZigBee.

Данный стандарт был разработан организацией ZigBee Alliance, в которую в настоящее время входит более ста компаний, деятельность которых прямо или косвенно связана с сетевыми технологиями[2]. Первая спецификация ZigBee была ратифицирована в декабре 2004 года, последняя — ZigBee 2007 принята 30 октября 2007.

Стандарт ZigBee представляет собой иерархию уровней, каждый из которых с помощью набора протоколов решает требуемые задачи. Уровни связаны между собой соответствующими интерфейсами. В этой иерархии ZigBee Alliance стандартизирует верхние уровни, начиная с сетевого.

Описанием физического уровня и уровня доступа к среде занимается Институт инженеров электротехники и электроники (IEEE), и они стандартизированы в соответствующем документе 802.15.4.

В документе IEEE 802.15.4 рассматриваются два типа устройств, работающих в сети: полнофункциональные устройства (FFD) и устройства с ограниченными функциями (RFD)[3]. FFD может обмениваться информацией с любыми другими устройствами в сети, в то время как RFD может взаимодействовать только с FFD. Предполагается, что RFD устройства будут основываться на более слабой аппаратной базе, на практике это, как правило, выражается в наличии дополнительной памяти у полнофункциональных устройств.

На физическом уровне используются три диапазона частот: 868 — 868,6 МГц (один канал), 906 — 928 МГц (10 каналов с шагом в 2 МГц) и 2400 — 2485 МГц (16 каналов с шагом в 5 МГц). Максимальная скорость передачи данных в первом диапазоне составляет 20 Кбит/с, во втором — 40 Кбит/с, в третьем — до 250 Кбит/с. Использование частот третьего диапазона разрешено практически во всем мире, что делает производство совместимых с ним устройств наиболее универсальным, а следовательно и коммерчески выгодным. На уровне доступа к среде применяется технология множественного доступа с контролем несущей и предотвращением коллизий (CSMA/CA).

В терминах документов ZigBee Alliance устройства могут принадлежать к одному из следующих основных типов[4]:

- координатор — FFD-устройство, являющееся организатором сети, в каждой сети может быть только один координатор;
- маршрутизатор — FFD-устройство, которое может являться промежуточным узлом;
- конечное устройство — RFD-устройство, напрямую обменивающееся сообщениями только с родительскими узлами.

Маршрутизаторы могут выполнять функции конечных устройств в сети, используя необходимые приложения. Но так как они являются промежуточными узлами, их энергопотребление слишком высоко. Конечные устройства большую часть времени могут находиться в спящем режиме, передавая данные, только когда это требуется. Как правило, конечные устройства питаются от автономных источников, в то время как FFD обеспечиваются стационарным питанием.

Основными топологиями сетей ZigBee являются:

- звезда, простейшая сеть, состоящая из координатора и конечных устройств напрямую подключенных к нему;
- дерево, в котором корнем является координатор, узлами — маршрутизаторы, а листьями — конечные устройства;
- ячеистая топология с избыточными связями;

Для построения сенсорных сетей применяется принцип many-to-one, согласно которому конечные устройства в сети передают всю собранную

информацию известному концентратору (как правило им выступает координатор сети). Такой подход позволяет существенно уменьшить размеры таблиц маршрутизации, благодаря отсутствию необходимости хранить адрес следующего прыжка для каждого устройства в сети.

Каждое устройство в сети имеет абсолютно уникальный 64-битный адрес. Другой, так называемый «короткий» адрес, имеющий длину 16 бит, выдается устройству родительским узлом (координатором или маршрутизатором) при подключении к сети. Согласно актуальной спецификации ZigBee «короткие» адреса распределяются случайным образом.

Маршрутизация в сетях ZigBee осуществляется на основе алгоритма дистанционно-векторного протокола по требованию (AODV). Соответственно, маршруты в сетях ZigBee не являются оптимальными, поиск нового маршрута производится в том случае, если передача данных по старому маршруту невозможна.

Прикладной уровень отвечает за передачу данных приложениям в пригодной форме. Обмен данными с приложениями осуществляется с помощью специальных интерфейсов, называемых «endpoint». ZigBee Alliance уделяет большое внимание стандартизации обмена данными на прикладном уровне, создавая различные профили приложений.

Наиболее известными производителями ZigBee чипов сейчас являются компании Jennic, Ember и Freescale. Одним из решений от компании Ember является система на кристалле EM250, включающая в себя 16-битный микроконтроллер XAP2b с частотой 12 МГц и приемопередатчик, работающий на частоте 2,4 ГГц. Компания Ember предоставляет продвинутые средства отладки. С помощью отладочного комплекта можно анализировать весь трафик, передаваемый устройствами друг другу. Чип поддерживает подключение внешней антенны, имеет аппаратную поддержку шифрования и 17 линий ввода/вывода. Цена EM250 с протоколом EmberZNet Pro составляет три-четыре доллара США[5].

Литература:

[1] Интеллектуальные системы на базе сенсорных сетей. // Институт точной механики и вычислительной техники им. С.А. Лебедева РАН, 2009

[2] <http://www.zigbee.org>

[3] IEEE 802.15.4

[4] ZigBee Technical Overview. // Tokyo Members Meeting Open House, Tokyo, Japan, February 28, 2008

[5] <http://electronicdesign.com/>

Встраиваемые операционные системы современных коммутаторов

А.Б. Лысак (ОАО «ОНИИП», ОмГУ им. Ф.М. Достоевского)

Показаны основные функции современных коммутаторов и роль операционной системы в их выполнении. Обосновано использование операционной системы мягкого реального времени для управления коммутатором. Рассмотрены основные решения в данной области, как в коммерческом секторе, так и на базе открытого программного обеспечения.

Ключевые слова: коммутаторы, встраиваемые системы, Linux

Встраиваемая система – это специализированная система, в которой микрокомпьютер встроен в устройство, которым он управляет. Встраиваемые системы очень многообразны, под это понятие подпадают устройства от мобильного телефона до системы управления ядерным реактором. Для того, чтобы сузить данное выше определение, и дать более точное представление этому понятию, можно выделить ряд признаков, характерных для встраиваемых систем.

Во-первых, в отличие от компьютеров общего назначения, встраиваемые системы ориентированы на выполнение определенной задачи или узкого круга задач. В соответствии с этим, они не рассчитаны на перепрограммирование или внесение в них каких-либо серьезных изменений конечным пользователем.

Во-вторых, наличие человека для работы встраиваемой системы в принципе не требуется. Одни системы могут быть полностью автономными, и не иметь абсолютно никаких интерфейсов взаимодействия с пользователем, другие требуют лишь задания начальных настроек человеком, а в дальнейшем могут функционировать без его вмешательства, третьи предполагают некоторый контроль или корректировку их работы человеком-оператором время от времени. Но в общем случае, участие человека в работе встраиваемой системы обязательным не является.

И, в-третьих, для большинства встраиваемых систем ключевыми являются следующие факторы:

- ограниченность вычислительных ресурсов;
- ограниченность физических размеров;
- минимизация энергопотребления;
- ориентация на выполнение узкого круга задач.

Таким образом, коммутатор явно подпадает под определение встраиваемой системы, а значит рассматривать его стоит, опираясь на критерии, характерные для всех встраиваемых систем.

Сетевой коммутатор представляет собой устройство, предназначенное для соединения нескольких узлов сети в пределах одного сегмента. Коммутатор традиционно работает на 2-м (канальном) уровне модели OSI и осуществляет доставку кадра нужному узлу на основе физического адреса (MAC-адреса) в заголовке кадра.

Если рассматривать сетевой коммутатор как встраиваемую систему, можно заключить, что в простейших моделях, где все задачи возлагаются на аппаратную часть, наличия никакой операционной системы не требуется.

Более сложные коммутаторы поддерживают:

- технологию VLAN, позволяющую группировать определенные хосты по каким-либо параметрам;
- реализацию алгоритма Spanning Tree, позволяющего автоматически определять древовидную конфигурацию связей в сети и избегать петель коммутации[1].

Такие коммутаторы должны предоставлять значительно больший перечень настроек, чем указан выше и, в целом, должны быть более интеллектуальными устройствами. В соответствии с этим, управляемые коммутаторы должны работать под управлением некоторой операционной системы, которая будет обеспечивать как минимум две базовые функции:

- предоставление пользователю некоторого интерфейса, через который он сможет осуществлять настройку и диагностику работы коммутатора;
- взаимодействие с аппаратной частью устройства для получения данных и перепрограммирования ее в соответствии с настройками пользователя.

Помимо выше обозначенного, современные коммутаторы часто обладают функциями верхних уровней модели OSI: статистическая и динамическая маршрутизация, преобразование сетевых адресов (NAT) и другими. Коммутаторы вобрали в себя слишком большой функционал, и в конечном итоге операционная система таких устройств должна предоставлять:

- интерфейс пользователя;
- гибкое взаимодействие с различной аппаратной начинкой;
- различные функции протоколов верхних уровней;
- диагностические утилиты.

При этом коммутатор должен удовлетворять основным критериям встраиваемых систем, перечисленным выше, и уделять особое внимание быстродействию в целом и отсутствию задержек в определенных задачах. Такие противоречивые требования приводят к необходимости использования в современных коммутаторах операционных систем реального времени.

Операционная система реального времени – это операционная система, обеспечивающая требуемую реакцию на событие с заданным временем отклика.

Традиционно различают операционные системы мягкого и жесткого реального времени. Операционная система, которая способна поддерживать необходимые временные требования к задачам реального времени даже при наиболее неблагоприятных нагрузках на процессор, и исключает возможность возникновения случаев несоблюдения принципа ограниченности времени реакции называется системой с поддержкой жесткого режима реального времени. В операционных системах мягкого реального времени случаи несоблюдения принципа ограниченности времени отклика допустимы, но их количество статистически не должно превосходить заранее определенного

числа в процентном отношении. Системы мягкого реального времени применяются там, где задержки очень нежелательны, но допустимы[3].

Одной из таких сфер применения является управление коммутационным оборудованием. В случае, если при выполнении какой-либо задачи реального времени, например, маршрутизации происходит задержка, пакет может быть доставлен в точку назначения с опозданием и быть выброшенным по причине тайм-аута. Потери данных при этом не происходит, так как специально для таких случаев применяются механизмы контроля протоколов транспортного уровня, в случае необходимости, обеспечивающие повторную пересылку. Однако общая производительность системы при этом снижается, поэтому разработчики операционных систем стараются свести количество таких случаев к минимуму.

Пожалуй, самой известной операционной системой реального времени на сегодня является QNX. Cisco Systems использует оптимизированную версию микроядра QNX Neutrino в программном обеспечении IOS XR. Программный пакет IOS XR предназначен для управления коммутаторами Cisco CRS-1, обеспечивает непрерывный режим работы и поддерживает развитые функции управления терабитными коммутаторами с распределённой архитектурой.

Вторым лидером в области высокопроизводительного коммутационного оборудования является компания Juniper, использующая операционную систему JunOS в своих устройствах.

Системы от Cisco и Juniper являются распространёнными на корпоративном рынке, однако из-за высокой стоимости их доля в общем количестве современных коммутаторов не так велика. На рынке коммутационного оборудования для дома и малого офиса до недавнего времени была широко распространена операционная система VxWorks. Богатый функционал до недавнего времени полностью удовлетворял нужды производителей сетевого оборудования. В совокупности с не слишком большой ценой лицензии, это делало операционную систему VxWorks практически единственным решением для коммутаторов и маршрутизаторов низшей и средней ценовой категории.

Однако в последнее время применение VxWorks стало уменьшаться в связи с появлением большого количества решений на базе свободного программного обеспечения. Одна из причин такого положения дел – бесплатность использования таких систем. Другая причина – растущее качество открытого программного обеспечения. Открытые реализации сетевых инструментов на сегодняшний день могут сравниться по качеству, а иногда и превосходят коммерческие аналоги. Кроме того, под свободные операционные системы, в частности Linux, уже написано огромное количество различного программного обеспечения, необходимо лишь приспособить его для встроенной операционной системы.

Существует несколько архитектур систем реального времени на основе ядра Linux.

Подход на основе тонкого ядра (или микроядра) использует второе ядро для абстрагирования интерфейса между аппаратными устройствами и ядром Linux. То ядро Linux, которое не работает в режиме реального времени, выполняется в фоновом режиме как задача с низким уровнем приоритета для тонкого ядра и на нем выполняются все задачи, не относящиеся к реальному времени. Задачи реального времени выполняются непосредственно в тонком ядре. Основным назначением тонкого ядра (кроме выполнения задач реального времени) является управление прерываниями.

Еще один вариант архитектуры реального времени - подход на основе ядра ресурсов. В этом подходе к ядру добавляются модули, которые обеспечивают резервирование ресурсов различного типа. Такое резервирование обеспечивает доступ к системным ресурсам с временным разделением (центральный процессор, сеть или доступ к диску). Эти ресурсы имеют несколько параметров резервирования, таких как период повторного доступа, необходимое время обработки (то есть, период времени, необходимый для выполнения обработки), а также временные ограничения.

Данные решения, несмотря на значительные плюсы, имеют и существенные недостатки. Дополнительные модули, которые приходится вводить в систему, зачастую делают ее менее гибкой. Кроме того, данные решения не позволяют ядру Linux в полной мере получить все преимущества режима реального времени.

Сегодня от ядра 2.6 можно получить поддержку мягкого режима реального времени на основе простой конфигурации, которая обеспечивает для ядра полную вытесняемость. В стандартном ядре 2.6 Linux, когда пользовательский процесс выполняет обращение к ядру (при помощи системного вызова), этот процесс не может быть вытеснен. Новая опция конфигурирования CONFIG_PREEMPT изменяет поведение ядра и позволяет вытеснить процесс, если имеется задание с более высоким приоритетом (даже если этот процесс ожидает завершения системного вызова)[4].

Литература:

- [1] Виктор и Наталья Олифер Локальные сети на основе коммутаторов, информационно-аналитические материалы URL: <http://www.citforum.ru/nets/lsok/contents.shtml>
- [2] И.Б. Бурдонов, А.С. Косачев, В.Н. Пономаренко, Операционные системы реального времени URL: http://www.citforum.ru/operating_systems/rtos/1.shtml
- [3] Жданов А.А. Операционные системы реального времени //PCWeek.1999. №8 с.27.
- [4] М. Тим Джонс Анатомия Linux-архитектур реального времени URL: <http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/l-real-time-linux>

Беспроводные Mesh-сети

А. В. Мартынович (ОАО «ОНИИП», ОмГУ им. Ф.М. Достоевского)

Рассматриваются имеющиеся протоколы маршрутизации, из которых подробно описываются AODV, OLSR и HWMP.

Ключевые слова: маршрутизация, беспроводные сети, mesh-сети, компьютерные сети

Беспроводными Mesh-сетями являются сети, имеющие ячеистую топологию, связи в которой производятся с применением имеющихся беспроводных технологий, и каждый узел сети связан со всеми соседними [1]. Такие сети за счет хорошей масштабируемости, надежности и увеличенной области покрытия [4] имеют более широкие возможности применения по сравнению с традиционно используемыми сетями “клиент-сервер”. В работе выделяются три уровня беспроводных Mesh-сетей: клиентские, магистральные и гибридные, и рассматриваются их различия и области применения.

Так как в рассматриваемом типе сетей используются уже известные беспроводные технологии, то проблема построения таких сетей главным образом состоит в маршрутизации и коммутации.

AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) – дистанционно-векторный протокол, в котором связь между узлами устанавливается только по требованию. Когда узлу-источнику необходимо установить связь с узлом назначения, он рассылает соседям RREQ (Route Request), который распространяется по сети. Узел назначения, получив множество копий RREQ, вычисляет наилучший путь и отправляет по нему RREP (Route Response). Узлы по данному пути в свою очередь обновляют свои таблицы маршрутизации, устанавливая векторы по пути следования RREP (рис. 1). Когда RREP достигнет узла-источника, связь считается установленной и дальнейшая передача данных происходит без дополнительных расходов [6]. Протокол с таким принципом работы называется реактивным.

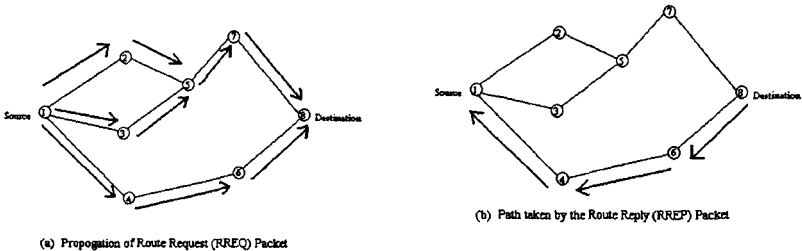


Рис. 1 Рассылка RREQ и RREP в протоколе AODV

OLSR (Optimized Link State Routing) – протокол состояния связи, оптимизированный для динамических сетей. В сети для каждого узла n выбирается набор узлов MPR(n) (Multi-Point Relay, многоточечный повторитель), имеющий связи со всеми соседями n (рис. 2). MPR призваны распространять информацию о сети. Доказано [3], что подмножества MPR-узлов достаточно, чтобы распространять информацию о состоянии сети всему множеству узлов сети. Так как связь между узлами постоянна, данный протокол является проактивным.

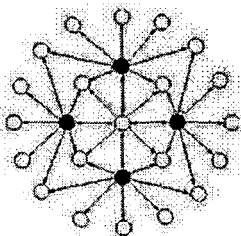


Рис. 2 Схема распространения информации о сети в протоколе OLSR (MPR-узлы закрашены черным)

HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) – гибридный протокол для беспроводных ячеистых сетей. Является частью стандарта 802.11s (draft) [5] и имеет реактивный и проактивный режим. В первом он работает сходно с AODV, а во втором случае организуется древоподобная структура сети (см. рис.3): узел, выбранный корнем, рассылает по сети RREQ, тогда как остальные узлы могут не только распространять этот RREQ, но и отвечать своими RREP.

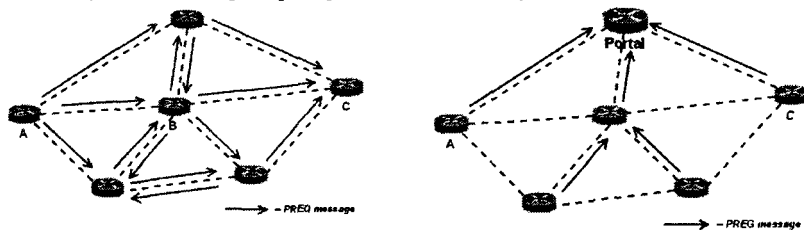


Рис. 3 Схема распространения информации о сети в протоколе HWMP

Беспроводные ячеистые сети уже применяются в гражданских и военных целях, несмотря на то, что открытый стандарт 802.11s еще не утвержден. Существуют как проприетарные, так и открытые реализации данных сетей, основанные на различных протоколах. Возможные области применения [2]:

- наблюдение;
- транспортные системы (рис. 4);
- автоматизация в строительстве;

- медицина;
- телефония.

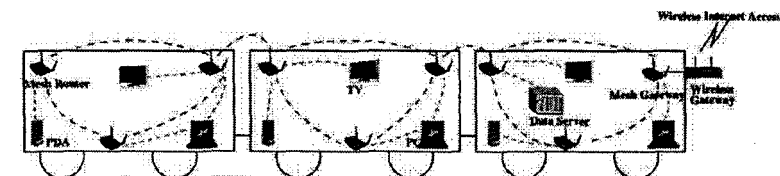


Рис. 4 Применение беспроводных ячеистых сетей в транспортных системах

Литература:

- [1] Akyildiz I., Wang X., Wang W. Wireless mesh networks: a survey // Computer Networks and ISDN Systems, v.47 n.4, p.445-487, 15 March 2005
- [2] Clausen T., Jacquet P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) [электронный ресурс] // RFC 3626 URL: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt> (дата обращения: 02.04.2010)
- [3] How Wireless Mesh Networks Work [электронный ресурс] / URL: <http://communication.howstuffworks.com/how-wireless-mesh-networks-work.htm> (дата обращения: 02.04.2010)
- [4] Perkins C., Belding-Royer E., Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing // RFC 3651 URL: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3651.txt> (дата обращения: 02.04.2010)
- [5] Вишнеvский В., Лаконцев Д., Сафонов А., Шпилев С. Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s // Электроника . — 2008. — №6 . — С. 64-69
- [6] Осипов И. Е. Mesh-сети: технологии, приложения, оборудование // Технологии и средства связи. — 2006. — №4. — С. 39-45

Применение разновидностей метаматериалов для изготовления нового класса СВЧ устройств

А.А. Серебренников (ОАО «ЦКБА», кафедра ЭФР ОмГУ им. Ф.М. Достоевского)

Рассмотрены проблемы получения высокого волнового сопротивления, а также способы их решения. На примере показано как волновое сопротивление зависит от паразитной полосы пропускания.

Ключевые слова: метаматериалы, Веселаго, показатель преломления, диэлектрическая проницаемость.

В последнее время в науке и технике появилось такое направление в СВЧ как метаматериалы. Изначально их применяли в СВЧ диапазоне, позже стали применять в звуковом и оптическом диапазонах.

В данной статье будут подробно рассмотрены проблемы получения высокого волнового сопротивления, а также будет дан краткий обзор о метаматериалах. Прежде чем приступить к их описанию, рассмотрим те же проблемы, которые встают перед разработчиками при использовании стандартных технологий изготовления СВЧ-плат. Особую значимость имеют широкополосные и сверхширокополосные устройства СВЧ диапазона.

Сверхширокополосными считаются такие устройства, которые имеют диапазоны рабочих частот с перекрытием в 4 и более октавы. Из-за жёстких ограничений по габаритам невозможно обеспечить перекрытие требуемых диапазонов за счёт параллельного включения нескольких более узкополосных устройств. Поэтому приходится разрабатывать такие же сверхширокополосные функциональные элементы: смесители, коммутаторы, частотные фильтры, направленные ответвители и т.д.

Как правило, такие функциональные элементы реализуются в полосковом исполнении. При изменении частоты сигнала в указанных выше диапазонах частот параметры полосковых устройств могут несколько раз диаметрально измениться:

- в полосах пропускания фильтров верхних частот (ФВЧ) на некоторых частотах образуются «провалы» в виде паразитных полос заграждения;
- в полосах заграждения фильтров нижних частот (ФНЧ) и полосно-пропускающих фильтров (ППФ) на некоторых частотах образуются паразитные полосы пропускания;
- симметрирующие устройства смесителей на некоторых частотах теряют свои симметрирующие свойства и т.д.

Для наглядности рассмотрим ФНЧ в полосковом исполнении, в котором индуктивности реализованы в виде отрезков линий с высоким волновым сопротивлением, а ёмкости – в виде отрезков линий с низким волновым сопротивлением (рис. 1).

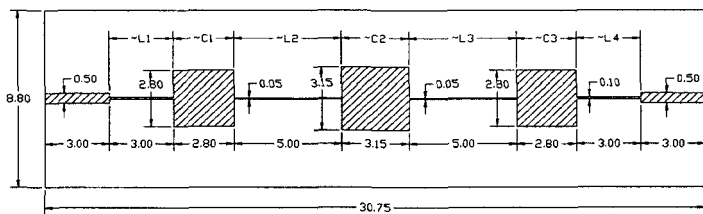


Рис. 1. Топология ФНЧ, реализованного на НМЛ
(подложка из поликора толщиной 0.5 мм)

Топологию такого фильтра можно рассчитать по следующим формулам:

$$L[\Gamma H] \approx Z_0 l \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}}{c} \quad (1)$$

$$Z_0 \gg Z_1$$

$$\tilde{n} = 3 \cdot 10^{11} i i / \tilde{n}, [i i], z_0 [f i]$$

$$C[\hat{O}] \approx \frac{1}{Z_0} \cdot \frac{l \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}}{c} \quad (2)$$

$$Z_1 \gg Z_0$$

$$\tilde{n} = 3 \cdot 10^{11} i / \tilde{n}, [i i], z_0 [f i]$$

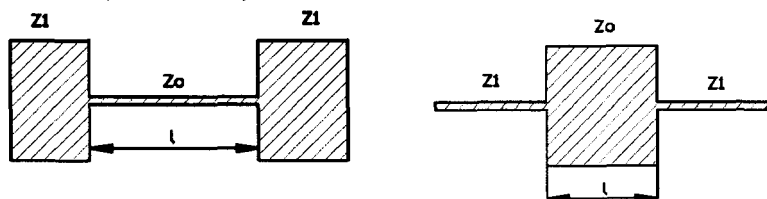


Рис. 2 Топологические индуктивности и емкости

При расчёте амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) такого фильтра в среде специализированной САПР получаются следующие результаты (рис. 3).

В окрестностях полосы пропускания АЧХ такого ФНЧ будет повторять АЧХ «идеального» ФНЧ, но с повышением частоты появляются серьёзные отклонения в виде паразитных полос пропускания.

Природа этого отклонения связана с соизмеримостью размеров индуктивностей и емкостей с длиной волны.

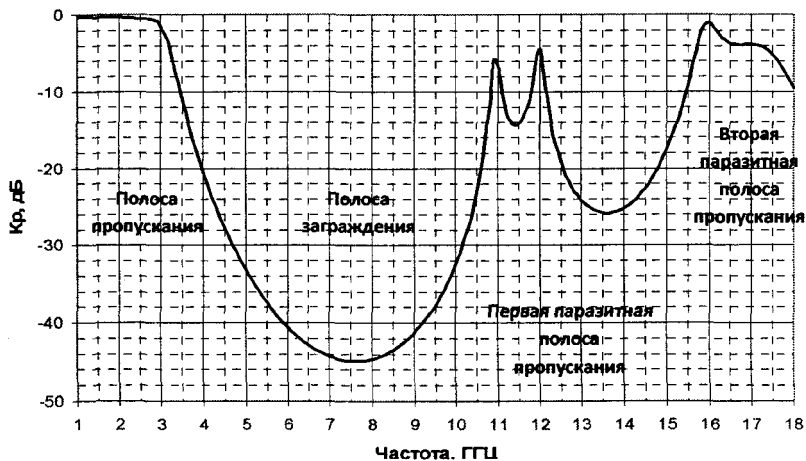


Рис. 3 АЧХ ФНЧ в полосковом виде

Рассмотрим, как влияет волновое сопротивление высокоомного проводника на паразитную полосу пропускания. Чем больше волновое сопротивление, тем выше по частоте находится паразитная полоса пропускания и тем ближе характеристика фильтра к идеальной характеристике. Поэтому можно сказать, что идеальной индуктивностью является токонесущий проводник линии с бесконечно большим волновым сопротивлением (рис. 4).

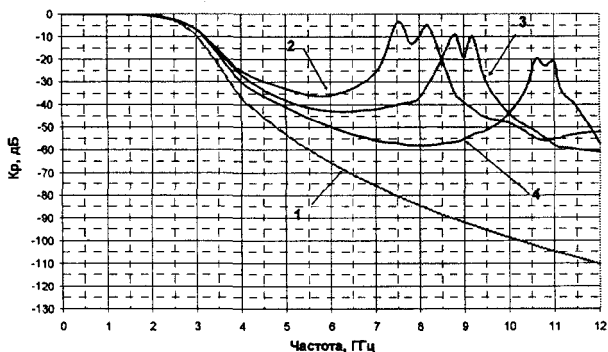


Рис. 4 АЧХ модели ФНЧ при различных ширинах (W) токонесущего проводника высокоомных отрезков НПЛ: 1 – АЧХ идеального ФНЧ; 2 – $W = 200$ мкм; 3 – $W = 100$ мкм; 4 – $W = 30$ мкм

Существует 3 способа повышения волнового сопротивления линий, которые имитируют индуктивности:

- уменьшение сечения токонесущего проводника;

- увеличение расстояния между токнесущим проводником и экраном;
- снижение диэлектрической проницаемости подложки.

Из-за ограничений вышеизложенных способов невозможно поднять волновые сопротивления до требуемых величин. Появившиеся в последнее время конструкции типа Defected Ground Structure, что дословно переводится «недостаток в экранном проводнике» позволяют немного снять остроту этой проблемы [1, 2, 3].

Нужно отметить, что до конца проблема высокого волнового сопротивления до сих пор не решена, но за последние 10 лет учёные-физики провели ряд экспериментальных работ, результаты которых возможно дают некоторую надежду на решение проблемы получения высоких волновых сопротивлений.

Известно, что электромагнитные свойства веществ определяются особенностями образующих их атомов и молекул, обладающих довольно узким диапазоном характеристик. Поэтому свойства миллионов известных материалов не так уж разнообразны и, диэлектриков в том числе.

Однако ещё в 1967 году советский ученый Виктор Георгиевич Веселаго выдвинул гипотезу о существовании материалов с отрицательным показателем преломления.

В этих гипотетических материалах световые волны должны двигаться против направления распространения луча. Он назвал эти материалы – «левыми» (left-handed) [4] материалами, так как макроскопические электрическое E и магнитное H поля в однородной плоской волне образуют с волновым вектором k левую тройку векторов. Позже такие материалы стали называть метаматериалами.

Известно, что показатель преломления n связан с ϵ и μ простым соотношением: $n = \pm \sqrt{\epsilon \cdot \mu}$.

$$\epsilon > 0, \mu > 0 \Rightarrow n > 0$$

$$\epsilon < 0, \mu < 0 \Rightarrow n < 0$$

Для всех известных материалов перед квадратным корнем должен стоять знак «+», и поэтому их показатель преломления положителен. Однако Веселаго показал, что у вещества с отрицательными ϵ и μ показатель преломления n должен быть меньше нуля. Отрицательные ϵ или μ получаются в том случае, когда электроны в материале движутся в направлении, противоположном по отношению к силам, создаваемым электрическим и магнитным полями.

Однако у всех известных веществ показатель преломления положителен: за нескольких лет интенсивных поисков Веселаго не нашел ни одного материала с подходящими электромагнитными свойствами, и его гипотеза была забыта. О ней вспомнили лишь в начале XXI в.

Благодаря последним достижениям в области материаловедения идея Веселаго была возрождена. В 2000 г. совместными усилиями британских и американских учёных в Калифорнийском университете в Сан-Диего был изготовлен материал с отрицательным показателем преломления.

Этот первый метаматериал представлял собой кубическую периодическую решётку из медных проводников и колец с разрезом, где в роли диэлектрика выступал воздух, шаг решетки был 2,7 мм. Падающие на такой куб микроволны с частотами около 10 ГГц вели себя так, как будто куб имел отрицательный показатель преломления.

Всё, что начало происходить в научном мире после публикации результатов этих экспериментов, в некоторых литературных источниках называют «большим взрывом»: число исследователей, групп и организаций, связанных с данной тематикой, стало стремительно расти. Стремительно растёт и число публикаций в данной области. Можно привести такой пример: в 2001 году на международной конференции IEEE по технике СВЧ о метаматериалах и левт-хандетструктурах нет ни одного упоминания, а на аналогичной конференции 2005 г. этой тематике посвящены несколько сессий.

В настоящий момент в метаматериалах, как правило, в различных комбинациях используются два типа проводящих элементов: отрезки тонких проводников (рис. 5) и разорванные кольцевые резонаторы (рис.6)

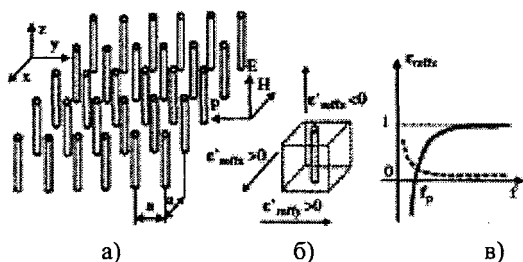


Рис. 5 Плотно упакованные тонкие проводники: а) множество тонких проводов; б) элементарная ячейка; в) эффективная диэлектрическая проницаемость

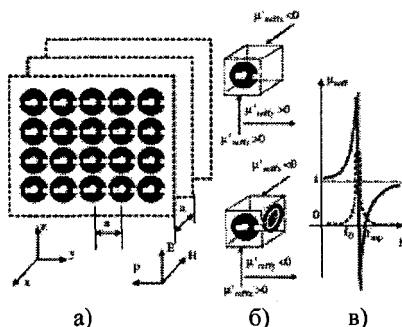


Рис. 6 Множество разорванных колец (SRR): а) множество разорванных колец; б) элементарная ячейка; в) эффективная магнитная проницаемость

Отрицательный показатель преломления в таких метаматериалах создаётся следующим образом. Упомянутые выше проводящие элементы в виде отрезков проволоки и разорванных кольцевых резонаторов являются крошечными резонансными контурами, которые имитируют отклик вещества на магнитное и электрическое поле. Свободные электроны в таких контурах колеблются с резонансной частотой, зависящей от формы и размеров проводников. Если приложено поле с частотой ниже резонансной, будет наблюдаться нормальная положительная реакция электронов. Однако с увеличением частоты электроны в материале с отрицательным показателем преломления входят в противофазу и начинают сопротивляться «толчкам» электромагнитного поля.

Нужно заметить, что нас как разработчиков СВЧ устройств интересует не отрицательный показатель преломления, а отрицательная диэлектрическая проницаемость.

Во-первых, при аномальном поведении диэлектрической проницаемости будет наблюдаться аномальное поведение волнового сопротивления. И, во-вторых, некоторые источники сообщают, что диэлектрическая проницаемость может находиться в пределах от нуля до 1. В этом случае, при стремлении диэлектрической проницаемости к нулю, волновое сопротивление будет стремиться к бесконечности, таким образом появляется возможность реализовывать идеальные индуктивности, пусть даже на отдельных частотах.

В заключении хочется сказать, что уже описаны некоторые функциональные устройства СВЧ, в которых используется данное физическое явление: частотные фильтры, балуны. В некоторых источниках делается предположение о том, что применение метаматериалов в СВЧ технике позволит создать новый класс СВЧ устройств: поглотителей, линий задержки, которые будут иметь лучшие характеристики и меньшие габариты по сравнению с обычными СВЧ устройствами.

Литература:

[1] Chul-Soo Kim, Duck-Hwan Kim. A Design of a Ring of a Ring Bandpass Filters with Wide Rejection Band Using DGS and Spur-line Coupling Structures. – The material of IEEE-2005 conferenc.

[2] Dong-Joo Kim, Yongwoo Jung-Hoon Kang. A Novel Design of High Directivity CPW Directional Coupler Design by Using DGS. – The material of IEEE-2005 conferenc.

[3] Jung Park, Gyo Kim, Jeong Kim. Miniaturization of Lowpass Filters by Using Artificial Transmission Lines. – The material of IEEE-2005 conferenc.

[4] Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ . – «Успехи физических наук», 1967. – Т. 2. – Вып. 3.

Критерии эффективности для адаптивных процессоров антенных решеток

Д.В. Сорокин (ОАО «ОНИИП», кафедра ЭФир ОмГУ им. Ф.М. Достоевского)

Кратко рассмотрены принципы работы адаптивной антенной решетки и критерии эффективности адаптивных процессоров антенных решеток.

Ключевые слова: адаптивные антенные решетки, весовые коэффициенты, критерии эффективности.

Применение адаптивных антенных решеток связано с желанием улучшить качество приема полезного сигнала по сравнению с обычными антенными решетками при наличии сигналов помех.

Основными элементами такой решетки является антенная решетка, диаграммообразующая схема и адаптивный процессор, который осуществляет подстройку весовых коэффициентов в диаграммообразующей схеме (Рис.1). Выходные сигналы $X_i(t)$ каждого элемента антенной решетки поступают в диаграммообразующую схему, где умножаются на комплексные весовые коэффициенты, а затем суммируются, образуя выходной сигнал адаптивной антенной решетки.

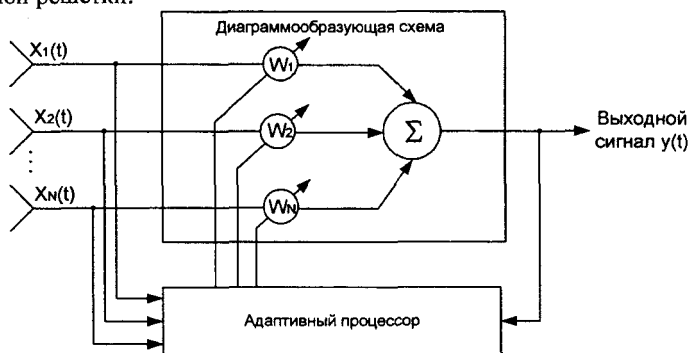


Рис. 1. Структурная схема адаптивной антенной решетки

В зависимости от алгоритма работы адаптивный процессор может вычислять весовые коэффициенты w_i , которые будут удовлетворять одному из критериев эффективности приема сигнала в установившемся режиме. Основными критериями, используемыми при построении адаптивных процессоров являются [1,2]:

1. средняя квадратическая ошибка (СКО);
2. отношение сигнал-шум (ОСШ);
3. функция правдоподобия;
4. дисперсия шума.

Рассмотрим первые два как наиболее употребительные.

Критерий СКО задается для антенной решетки обычной конфигурации. Предположим, что полезный сигнал $s(t)$ известен и его форма определяется опорным сигналом $d(t)$. Структурная схема такой адаптивной решетки приведена на рис.2.

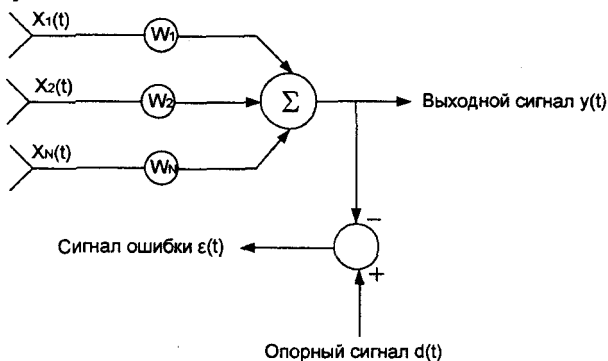


Рис. 2. Структурная схема адаптивной антенной решетки при известном полезном сигнале

В действительности это предположение не выполняется, однако обычно имеется достаточно информации о полезном сигнале и приближенно соответствующий опорный сигнал может быть получен после обработки сигнала на выходе антенной решетки. Разность между желательной реакцией антенной решетки и действительным выходным сигналом равна:

$$\varepsilon(t) = d(t) - w^T x(t) \quad [1],$$

где w - вектор весовых коэффициентов. Математическое ожидание этой ошибки:

$$E(\varepsilon^2(t)) = \overline{d^2(t)} - 2w^T r_{xd} + w^T R_{xx} w,$$

где $R_{xx} = \overline{xx^T}$ - корреляционная матрица, $r_{xd} = (\overline{x_1 d}, \overline{x_2 d}, \dots, \overline{x_N d})^T$.

Т.к. $d(t) = s(t)$, то $\overline{d^2(t)} = S$, и, следовательно,

$$E(\varepsilon^2(t)) = S - 2w^T r_{xd} + w^T R_{xx} w.$$

Задача оптимизации заключается в минимизации $E(\varepsilon^2(t))$ путем выбора весовых коэффициентов w . Коэффициенты w , следовательно, могут быть найдены из уравнения

$$\nabla_w (\overline{\varepsilon^2}) = 0.$$

Т.к.

$$\nabla_w (\overline{\varepsilon^2}) = -2r_{xd} + 2R_{xx} w,$$

откуда

$$w_{opt} = R_{xx}^{-1} r_{xd}.$$

Данное уравнение является уравнением Винера-Хопфа, а w_{opt} - оптимальное винеровское решение [1].

Критерий отношения сигнал-шум также применяется при обычной конфигурации антенной решетки для систем связи и обнаружения. Выходной сигнал представляется в виде:

$$y(t) = w^T x(t) \quad [1],$$

где входной сигнал представляет собой сумму сигнала $s(t)$ и шума $n(t)$:

$$x(t) = s(t) + n(t).$$

Мощность выходного сигнала будет

$$E(|y_s(t)|^2) = |w^T s|^2,$$

мощность шума

$$E(|y_n(t)|^2) = |w^T n|^2.$$

Выходное отношение сигнал-шум будет определяться как

$$\left(\frac{s}{n}\right) = \frac{|w^T s|^2}{|w^T n|^2} = \frac{w^T [s s^T] w}{w^T [n n^T] w} = \frac{w^T R_{ss} w}{w^T R_{nn} w},$$

или

$$\left(\frac{s}{n}\right) = \frac{z^T R_{nn}^{-1/2} R_{ss} R_{nn}^{-1/2} z}{z^T z}, \text{ где } z = R_{nn}^{1/2} w.$$

Числитель в выражении для (s/n) представляет собой квадратичную форму и принимает значения между минимальным и максимальным собственными значениями симметричной матрицы $R_{nn}^{-1/2} R_{ss} R_{nn}^{-1/2}$, оптимизация с помощью выбора вектора весовых коэффициентов w сводится к задаче нахождения собственного вектора, причем s/n должно удовлетворять соотношению:

$$R_{ss} w = (s/n) R_{nn} w.$$

Максимальному собственному значению $(s/n)_{opt}$ соответствует собственный вектор w_{opt} , являющийся оптимальным вектором весовых коэффициентов для антенной решетки. Решая уравнение, получаем:

$$w_{opt} = \frac{w_{opt}^T s}{w_{opt}^T R_{nn} w_{opt}} R_{nn} w_{opt}.$$

Литература:

[1] Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.

[2] Введение в теорию адаптивных антенн/ А.А. Пистолькорс, О.С. Литвинов. – М.: Наука, 1991. – 200 с.

Обзор протокола SimpliciTI и его использование в устройствах с низким энергопотреблением

А.А. Строков (ОмГУ им. Ф.М. Достоевского)

В данной работе рассмотрен протокол SimpliciTI™, произведено сравнение с протоколом беспроводного доступа ZigBee™. Рассмотрены особенности, такие как открытость, позиционирование на рынке и ограничения протокола. Проведен анализ используемых частот, рассмотрена возможность использования открытых диапазонов.

Был выполнен сравнительный анализ и подбор компонентов с низким энергопотреблением (были рассмотрены радиомодули Chipcon, а также микроконтроллеры фирм Atmel и Texas Instruments) и рассмотрены примеры использования.

В частности, проведен обзор средства разработки ez430-Chronos.

Ключевые слова: беспроводные технологии, сенсорные сети

Когда мы сталкиваемся с большим количеством малогабаритных датчиков (а такая ситуация может возникнуть не только на производстве, хороший пример — датчики системы пожарной безопасности), основной проблемой является сбор информации. Простой способ — проложить провода к датчикам — зачастую неприемлем ввиду недоступности датчика или нецелесообразен по причине высокой стоимости прокладки. Если речь идет о мобильных решениях, вариант проводной связи вообще не рассматривается.

Очевидным решением является использование беспроводных технологий. Преимуществами беспроводных сенсорных сетей (т. е. сетей, обслуживающих датчики — сенсоры) являются мобильность, возможность размещения датчиков в труднодоступных местах и с автономным питанием, а также удобство обслуживания и быстрота развертывания сети.

На сегодняшний момент зарекомендовал себя протокол ZigBee™, который является закрытым коммерческим протоколом и предоставляет полный стек: от реализации физического уровня (на основе стандарта IEEE 802.14.5) до предоставления классов-контейнеров для реализации на уровне приложений. Открытой альтернативой ZigBee™ является разработанный компанией Texas Instruments протокол SimpliciTI™. Преимуществами его являются полная открытость кода и бесплатность. Библиотека доступна на сайте Texas Instruments (ti.com) для свободного скачивания. Размер библиотеки — около 2 КБ, что позволяет встраивать ее даже в маломощные микроконтроллеры. Вы можете использовать данный протокол с любыми приемопередатчиками, как стандарта IEEE 802.14.5, так и открытых диапазонов радиочастот (к примеру, 433 МГц — ограничение по мощности в этом гражданском диапазоне составляет 10 мВт, характерная максимальная дальность — 2 км). При желании вы можете написать собственную модификацию SimpliciTI.

К недостаткам можно отнести ограниченную топологию: если ZigBee™ позволяет реализовать практически любую топологию, включая MESH-сеть, то

SimpliciTI™ работает по топологиям «звезда», «звезда с ретрансляцией» (с одним уровнем ретрансляции). Кроме того, SimpliciTI™ накладывает ограничения на размер сети, который не может превышать 100 узлов. Причинами данных ограничений являются небольшое количество байт, выделенных под адресацию. Маршрутизации, как таковой, вообще не уделяется внимание.

Кадр протокола SimpliciTI состоит из следующих частей:

- преамбула и поле Sync (длина зависит от используемого интерфейса) — заполняется приемопередатчиком, используется для синхронизации;
- длина пакета в байтах (1 байт) — заполняется программно при передаче и частично фильтруется при приеме;
- MISK — различные данные, поле специфично для разных трансиверов и может отсутствовать;
- адрес получателя (4 байта);
- адрес отправителя (4 байта);
- порт (1 байт) — номер порта приложения (биты 0-5) и биты шифрования. Порты 0x20 – 0x3F зарезервированы за приложением, 0-0x1F — за сетевым уровнем;
- информация об устройстве (1 байт);
- идентификатор транзакции (1 бит);
- данные приложения (до 52 байт);
- контрольная сумма (размер также задается приемопередатчиком).

Одной из производителей модулей для SimpliciTI является Chipcon AS (Норвежская компания, выпустившая первый полноценный 802.15.4 приемопередатчик, в 2006 г. была куплена в Texas Instrument и сейчас является подразделением), выпускающая модули CC1000 для диапазона в 315–915 МГц и CC2000 для диапазона 2,4 ГГц. Хорошим примером являются модули CC1101 (рис. 1) на частотах 315, 433, 868 и 915 МГц, и CC2530 (рис. 2) в диапазоне 2,4 ГГц. Эти модули предоставляют пользователю возможность конфигурации канала, а также 64-байтный FIFO буфер: после установки связи данные записываются в буфер передатчика и читаются из буфера приемника.

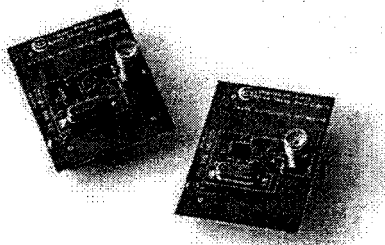


Рис. 1 Модули CC1101 от Chipcon

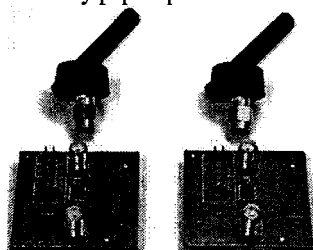


Рис. 2 Модули CC2530 от Chipcon

Понятно, что радиомодуль может функционировать только под управлением микроконтроллера, на плечи которого ложится также опрос датчиков (помните,

с чего все начиналось?) и управление системой в целом. Сейчас широкое распространение получили SoC — System-on-chip («система на кристалле»), где в одном корпусе размещены радиомодуль, модем и микроконтроллер. Это позволяет уменьшить габариты, энергопотребление, упростить процесс разработки и повысить надежность. В качестве примера были сравнены чипы от трех ведущих производителей микроконтроллеров: Texas Instrument (CC2510F32, построенная на базе микроконтроллера с пониженным энергопотреблением MSP430 и вышеупомянутого CC2530), Atmel (Atmega128RFA1 — 8-битный МК с AVR архитектурой и ISM модуль 2,4 ГГц) и ST Microelectronics (STM32W108, в основе которого лежит МК ARM Cortex и модуль 2,4 ГГц)

Сравнение энергопотребления приведено в таблице 1:

*Таблица 1
Энергопотребление микроконтроллеров
в различных режимах*

Модель	Потребляемый ток, мА			Мощность передачи, dBm
	Спящий режим	Прием данных	Передача данных	
CC2510F32 (TI)	2,5	21,5	26	0
Atmega128RFA1 (Atmel)	4,1	16,6	18,6	+6
STM32W108 (ST)	—	27	31	+3

Хорошим примером беспроводного сенсора является инструмент разработчика ez430 «Chronos» от Texas Instruments (рис. 3). Устройство выполнено в форм-факторе часов, имеет ударопрочный корпус и способно работать под водой на глубине до 30 метров. На борту «часы» имеют SoC CC430F6137 (существуют модификации для частот 433, 868 и 916 МГц), 3-х осевой акселерометр, барометрический высотомер и термометр. Также устройство оснащено 96-сегментным LCD дисплеем.

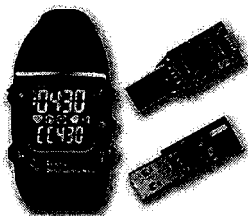


Рис 3. Инструмент разработчика ez430-Chronos

В комплект, кроме самих часов, входит JTAG-отладчик, с помощью которого встроенный микроконтроллер может программироваться и отлаживаться и базовый модуль в формате USB-dongle для обеспечения связи часов с компьютером или ноутбуком. Цена комплекта — 71\$.

Конечно, данное устройство не является полноценным датчиком, пригодным для сбора данных в практической ситуации, однако концепция сенсорной сети представлена в совершенстве: устройство собирает данные и передает их по сети, построенной на базе SimpliCiTI. Примерами использования могут быть: управление курсором мыши наклоном корпуса часов, открывание двери постукиванием по корпусу — применение ограничено только вашей фантазией.

В заключение хочется сказать, что SimpliCiTI предоставляет широкий простор для творчества как в области реализации физического канала, так и на прикладном уровне, к тому же в некоторых случаях позволяет сэкономить на программной составляющей и сертификации оборудования. Для небольших сенсорных сетей с достаточно простыми передаваемыми данными этот протокол является идеальным решением.

Если же требуется развернуть серьезный проект, но нет опыта разработки протоколов передачи данных и временные ресурсы ограничены, то стоит взглянуть на готовые решения ZigBee — часто затраты на написание собственной библиотеки превышают стоимость предлагаемого продукта, особенно если речь идет о крупных сетях промышленного масштаба.

Литература:

[1] <http://ti.com/simpliciti>;

[2] <http://compeljournal.ru>;

[3] <http://atmel.com>;

[4] <http://zigbee.org>

Элементная база оптоэлектронной техники

А.А. Строчков (ОмГУ им. Ф.М. Достоевского), Ю.Н. Вольхин (ОАО «ЦКБА»)

В докладе рассмотрены некоторые элементы современной оптоэлектронной техники. Основной упор сделан на пассивные элементы: тракты распространения сигнала, соединители, разветвители, изоляторы, коммутаторы, устройства частотного уплотнения. Обращено внимание на технологии и методики работы с оптическими элементами. Также рассмотрены оптические усилители на основе волокна, легированного эрбием (EDFA).

Ключевые слова: оптоэлектроника, фотоника, элементная база, оптоволоконная техника, оптика

Оптоэлектроника — область техники, в которой рассматривается взаимодействие оптических и электрических сигналов. Современные технологии позволяют выполнять модуляцию оптического излучения сверхвысокочастотным (СВЧ) сигналом. При распространении модулированного оптического сигнала не возникает отрицательных эффектов в диапазоне СВЧ, таких как, например, паразитные наводки между элементами. Наиболее часто используемым каналом распространения оптического сигнала является **оптическое волокно**. Преимуществами его являются малый вес, нечувствительность к электромагнитным помехам, сверхширокая полоса пропускания, а также низкие потери распространения (для сравнения: модулированный оптический сигнал распространяется с затуханием от 2,5 до 0,21 дБ/км, радиосигнал модулирующей частоты в эфире распространяется с затуханием около 60 дБ/км).

Оптоволокну представляет собой вытянутый цилиндр, состоящий из двух концентрических слоев: ядра, предназначенное для переноса света, и оптической оболочки, имеющей отличный от ядра показатель преломления и обеспечивающей полное внутреннее отражение света. Таким образом, свет движется внутри волокна зигзагообразно, многократно отражаясь от границы ядро-оболочка (рис. 1):

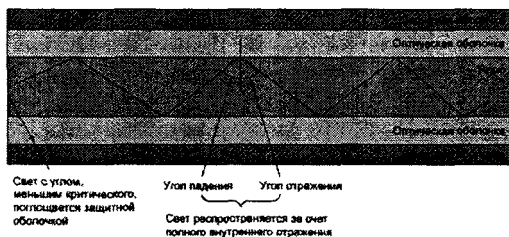


Рис. 1. Структура оптического волокна

Нужно отметить, что свет может переотражаться под разными углами, формируя несколько различных путей распространения света, называемых модами (рис. 2) (в общем случае мода — возможное решение уравнений Максвелла, определяющее тип распространения электромагнитного поля). В зависимости от поведения луча, распространяющегося в ядре, волокна разделяются на многомодовые со ступенчатым (где ядро имеет однородный показатель преломления и лучи отражаются только на границе ядро-оболочка) или сглаженным (показатель преломления уменьшается от центра ядра к оболочке и лучи преломляются внутри ядра, не испытывая резких переотражений) индексом, и одномодовые (где диаметр ядра уменьшается настолько, что в нем может передаваться только одна мода).

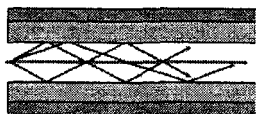


Рис. 2 Многомодовое волокно со ступенчатым индексом

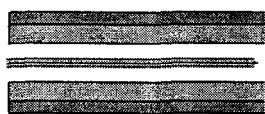


Рис. 3 Одномодовое волокно

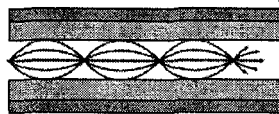


Рис. 4 Многомодовое волокно со сглаженным индексом

Диаметр ядра в одномодовом волокне — 9 мкм, в многомодовом — от 50 до 900 мкм. Диаметр оболочки — 125 мкм.

Моды высших порядков (с более частыми переотражениями и меньшим углом отражения) проходят больший путь и распространяются с меньшей линейной скоростью, чем моды низких порядков. Это явление называется *модовой дисперсией* и приводит к «расплыванию» импульса в волокне. Значение модовой дисперсии составляет 15-30 нсек/км. Поэтому для передачи широкополосных сигналов допустимо использование только одномодового волокна. Кроме модовой, на распространение сигнала влияет *частотная (молекулярная) дисперсия* — зависимость скорости распространения от частоты. При этом в области 850 нм скорость распространения прямо пропорциональна частоте, в области 1550 нм — обратно пропорциональна. В некоторой точке спектра происходит совпадение, и различные длины волн движутся с одной и той же скоростью. Это совпадение скоростей происходит в области 1310 нм, называемой длиной волны с нулевой дисперсией. И наконец, в одномодовых системах существенное влияние оказывает *волноводная дисперсия*: свет распространяется по ядру и оболочке, которые имеют различные показатели преломления.

Основным материалом, применяемым для изготовления волокна, является кварцевое стекло. Из этого материала изготавливают как оболочку, так и ядро. Более дешевым вариантом является кварцевое волокно с пластиковой оболочкой (PCS), имеющее худшие характеристики. Наконец, самые плохие характеристики у полностью пластиковых волокон. Ядро пластикового волокна

изготавливается из полиметилакрилата, оболочка — из фторполимеров. Однако там, где не требуются низкие потери и широкая полоса пропускания, пластиковые волокна являются удобным недорогим решением.

Стоит также отметить, что в волокна добавляют различные примеси — легируют волокно. Такими примесями могут быть соединения эрбия, натрия, титана. Легирование волокна позволяет изменять его оптические и механические характеристики.

Свет, распространяющийся по волокну, испытывает рассеяние на механических дефектах, рэлеевское рассеяние (обусловленное неоднородностью коэффициента преломления) и поглощение. Основным поглощающим фактором являются гидроксильные радикалы ОН и ионы переходных металлов. Поглощение носит нелинейный характер зависимости от длины волны распространяющегося света. Для кварцевого волокна выделяют **окна прозрачности** в областях 820—850, 1300 и 1530—1560 нм, и области высокого затухания в диапазонах 700 и 1400 нм:

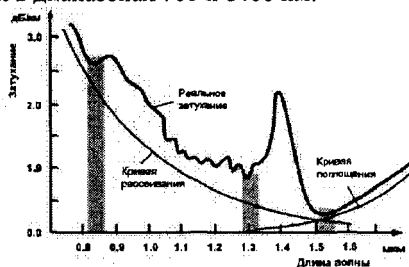


Рис. 5 Зависимость затухания в кварцевом волокне от длины волны

Одномодовые волокна работают в окнах прозрачности 1310 и 1550 нм.

Технологии соединения включают в себя разъёмные и неразъёмные соединения. Неразъёмное соединение волокна может обеспечиваться сваркой или сплайс-соединением. Для разъёмного соединения используются коннекторы ST, FC (с резьбовой фиксацией), SC (полноразмерные с фиксацией защёлкой) а также MT-RJ и LC (уменьшенного размера с фиксацией защёлкой).

Соединение характеризуется вносимыми потерями и коэффициентом обратного отражения. На эти параметры влияют дефекты соединения: радиальные, осевые и угловые (рис. 6, 7, 8), различные диаметры ядра соединяемых волокон, эллиптичность ядра, а также различные численные апертуры.

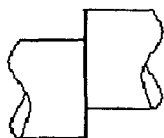


Рис. 6 Радиальный дефект соединения



Рис. 7 Угловой дефект соединения

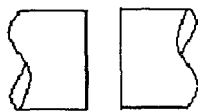


Рис. 8 Осевой дефект соединения

Числовая апертура (Numeric Aperture — NA) — способность волокна собирать лучи. Апертура определяет максимальный угол ввода света в волокно.

В одномодовом волокне апертура может быть формально определена из показателей преломления ядра и оболочки:

$$NA = \sqrt{n_{\text{ядро}}^2 - n_{\text{оболочка}}^2}$$

однако практического смысла она не имеет, т. к. в одномодовое волокно луч под углом не инжектируется.

От значения апертуры прямо зависит модовая дисперсия (чем больше апертура, тем больше возможных траекторий распространения света). Источники и приемники излучения также имеют собственные апертуры. Предельный угол в общем случае определяется как $\theta = \arcsin(NA)$. Для полного согласования апертура приемника должна быть больше апертуры источника.

Важным этапом, предшествующим соединению, является **скол волокна** — срез его строго под прямым углом с получением идеально ровной поверхности среза. Это необходимо для того чтобы лучи при выходе из волокна не рассеивались и не отклонялись.

Сварка волокна является наиболее совершенным методом неразъемного соединения, позволяющим получать потери в соединении меньше 0,2 дБ. Современные аппараты производят сварку в автоматическом режиме: волокна стыкуются микроприводами под контролем видеокамеры, после чего нагреваются электрической дугой или лазером, за счет чего происходит расплавление и сварка волокон.

Сплайс-соединение представляет из себя трубочку (часто из стекла), в которую вводятся волокна до соприкосновения или пару пластин, в которых зажимается место стыка. Для уменьшения потерь пространство в стыке заполняется специальным иммерсионным гелем. Потери в таком соединении составляют 0,3-0,5 дБ. Стоит также учитывать, что со временем потери в сплайсе увеличиваются из-за высыхания геля или смещения торцов стыкуемых волокон.

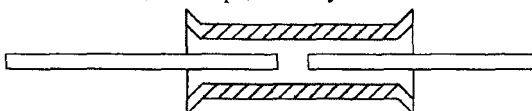


Рис. 9 Сплайс-соединение

Современные **разъемные соединители** (коннекторы) представляют собой закрепленный в керамической или пластмассовой гильзе-наконечнике отрезок

оптоволокна, конец которого тщательно отполирован. Выпускаются коннекторы в виде отрезка оптоволокна с двумя установленными соединителями, который предназначен для разрезания и разваривания — так называемого *пигтейла* (pig-tail).

Коннекторы выпускаются в обычном и мини форм-факторе (SFF — small form factor).

К обычным разъемам относят следующие типы:

ST — самый простой тип, состоящий из байонетного замка и керамического наконечника. Из-за простоты этот тип разъема чувствителен к механическому воздействию на кабель;

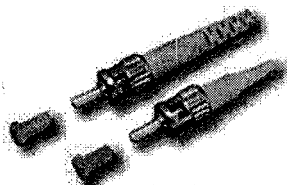


Рис. 10 Разъем типа ST

FC — более совершенный разъем. Его изготавливают с жесткими допусками, что позволяет получить минимум потерь и обратных отражений. Кроме того, разъем усложнен за счет подпружинивания наконечника, что позволяет лучше выдерживать вибрации и удары. Для фиксации разъем снабжен накидной гайкой M8. В зависимости от качества полировки разъем содержит в названии аббревиатуру PC, SPC или UPC. Усилие вырыва коннектора составляет 90 Н. Один из основных разъемов, применяемых в оптоволоконной технике.



Рис. 11 Разъем типа FC

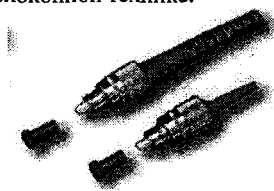


Рис. 12 Разъем типа FC/APC

FC/APC — разновидность FC разъема, отличающаяся полировкой торца под углом 8° , что позволяет максимально снизить отражающийся сигнал. Разъемы FC и FC/APC несовместимы, поэтому FC/APC обозначаются зеленым цветом хвостовика;

SC — разъем с квадратным корпусом, не требующий вращательного движения при подключении. Минусом является меньшая, по сравнению с FC, механическая прочность (усилие вырыва 45 Н) и большая цена. Во многих странах разъемы данного типа приняты как основной стандарт. Разъемы маркируются цветом: голубые или бежевые — одномодовые, черные — многомодовые, зеленые — APC модификации.

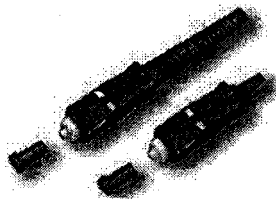


Рис. 13 Разъем типа SC

Также существуют дуплексные модификации, позволяющие соединять два коннектора для получения дуплексной вилки.

Мини-разъемы (Small Form Factor) призваны увеличить плотность монтажа. Основных типов два:

- LC — лучший по своим характеристикам SFF разъем. Выпускается в вариантах MM и SM, размеры соответствуют стандарту RJ-45 и легко объединяется в дуплексную пару подобно SC разъемам

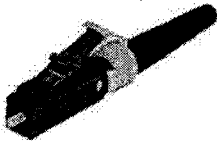


Рис. 14 Разъем типа LC



Рис. 15 Разъем типа MT-RJ

- MT-RJ — дуплексный разъем с прямоугольными пластмассовыми наконечниками. Имеет достаточно высокие погрешности изготовления и высокие потери. Все разъемы работают в температурном диапазоне от -60 до +85 °С, выдерживают удары до 1000 G. В России коннекторы выпускались еще в 90-х годах, однако падение цен на импортную продукцию привело к тому, что в России выпускаются только разъемы специального назначения.

Также существуют устаревшие или редко используемые коннекторы типов SMA, DIN, D4 и E2000.

Источниками оптического излучения могут быть лазеры и светодиоды, однако для ввода луча в одномодовое волокно пригодны лишь лазеры, обладающие, в отличие от светодиодов, узкой диаграммой направленности. Кроме того, ширина спектра лазера намного меньше ширины спектра светодиода, что является решающим фактором при оптической обработке СВЧ сигналов.

Основным типом лазеров, используемых в оптоволоконной технике, являются полупроводниковые (GaAlAs, GaInP) лазеры на гетеропереходе. Диаметр излучающего пятна в волоконных лазерах — 5-25 мкм, мощность лежит в пределах 13-100 мВт.

Приемниками излучения служат фотодиоды с p-n переходом, p-i-n фотодиоды, лавинные фотодиоды, фототранзисторы и МДП структуры.

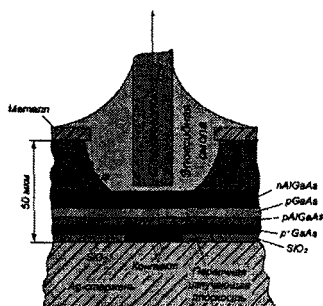


Рис. 16 Соединение оптоволокну с GaAs лазером

Стоит обратить особое внимание на соединение волокна и источника/приемника оптического излучения. Соединение может выполняться напрямую или с помощью линзы. В первом случае (рис. 16) оптоволокну закрепляется в металлической оправке с помощью эпоксидной смолы, после чего поверхность смолы и торец волокна полируются. Непосредственное соединение предъявляет высокие требования к соосности волокон и согласованию апертур и диаметров.

Другой способ заключается в использовании линзы, направляющей лучи в волокно.

Разветвители выполняют задачу разделения или объединения нескольких световых потоков. По принципу работы делятся на биконические — ответвление происходит через боковую грань, и торцевые, в которых свет распространяется через торцы волокон.

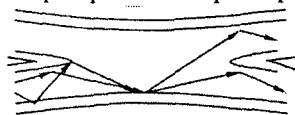


Рис. 17 Схема биконического разветвителя

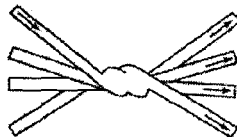


Рис. 18 Спексаемый разветвитель «передающая звезда»

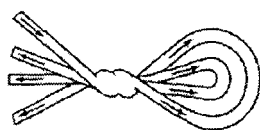


Рис. 19 Спексаемый разветвитель «отражающая звезда»

Биконические разветвители (рис. 17) могут быть получены сведением наполовину сточенных в оправке волокон или спеканием скрученных волокон (рис. 18, 19).

Простейший торцевой разветвитель изображен на рис. 20. Недостатком его являются достаточно большие вносимые потери и сложность реализации, особенно в одномодовых системах. Для уменьшения потерь его конструкцию модифицируют добавлением диэлектрических градиентных линз (рис. 21).

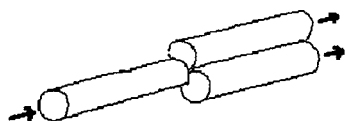


Рис. 20 Схема простейшего торцевого разветвителя

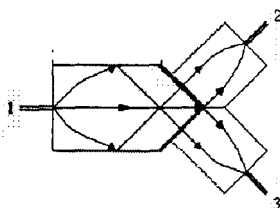


Рис. 21 торцевой разветвитель на основе диэлектрических линз

Разветвители, в которых используются полупрозрачные зеркала (рис. 22), не нашли широкого применения вследствие сложности изготовления, высоким требованиям к зеркалам и больших вносимых потерь.

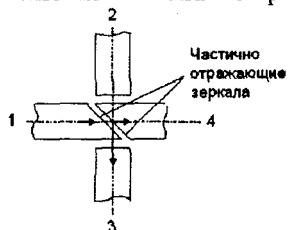


Рис. 22 Ответвитель на полупрозрачном зеркале

Нельзя также не упомянуть направленные ответвители (рис. 23), представляющие собой два волокна, сведенных на близкое расстояние (порядка нескольких микрон), в которых благодаря электромагнитной связи наблюдается перекрестное возбуждение оптических мод.

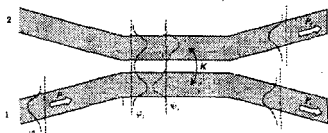


Рис. 23 Оптический направленный ответвитель

Аттенюаторы — устройства, ослабляющие оптический сигнал. Аттенюатор суть оптический соединитель с изменяемым торцевым зазором. Увеличивая зазор, мы добиваемся увеличения ослабления сигнала.

Поляризаторы, являющиеся пластинками, изготавливаемыми из материалов с двойным лучепреломлением, при прохождении через которые свет поляризуется — вектор напряженности электрического поля колеблется в одной плоскости. Поляризаторы находят широкое применение в составе других оптических элементов.

Оптические изоляторы или **вентили** выполняют такую же функцию, как вентили в электронике — пропускают луч в прямом направлении и задерживают в обратном. Работа их основана на электрооптическом эффекте Фарадея — при прохождении луча через магнитооптический материал (например, кристаллы редкоземельных гранатов), находящийся в магнитном поле происходит поворот плоскости поляризации. Таким образом, система из двух поляризаторов, повернутых на 45° и размещенного между ними фарадеевского ротатора пропускает свет в одном направлении и не пропускает в другом (рис. 24).

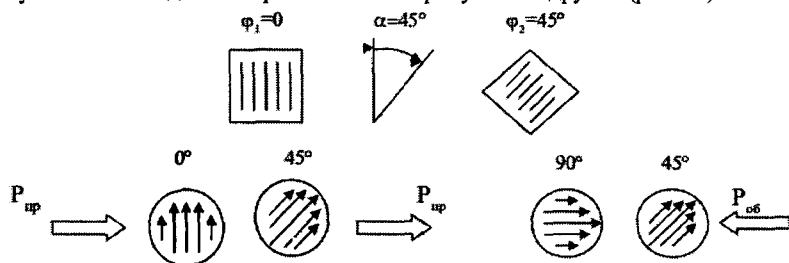


Рис 24 Иллюстрация работы оптического изолятора на фарадеевском ротаторе

Коммутаторы предназначены для переключения света из одного входа в один из нескольких выходов (или наоборот, направления сигнала из одного из входов на выходной волновод). Основной метод коммутации — механически перемещаемое микрзеркало. Изменяя положение зеркала, мы можем направлять луч света в один из волноводов (рис. 24).

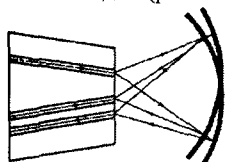


Рис. 25 Схема механического зеркального коммутатора

Главным недостатком микромеханических систем является низкая скорость переключения. От этого недостатка избавлен электрооптический модулятор, в котором луч отклоняется за счет эффекта Погкельса в кристалле с двойным лучепреломлением.

Устройства спектрального уплотнения используются в WDM системах, где по одному волокну передаются на разных несущих частотах (с разнесением 50-200 ГГц) разные каналы. Частоты объединяются демультиплексором и разделяются мультиплексором. Существуют три модификации мультиплексоров: основанные на дисперсии, на основе дифракционной решетки и на основе светофильтров.

1. Дисперсионные (де)мультиплексоры состоят из призмы, в которой за

счет дисперсии происходит разделение лучей с их последующей фокусировкой линзами (рис. 26). Недостатком являются большие габариты устройства, а также большие вносимые потери.

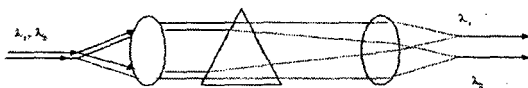


Рис. 26 Дисперсионный мультиплексор

2. Дифракционные устройства (рис. 27) основаны на свойстве дифракционной решетки отклонять свет различных длин волн на разные углы. Размеры и вносимые потери, а главное — ширина полосы пропускания у дифракционных мультиплексоров имеют лучшие, по сравнению с дисперсионными схемами, характеристики.

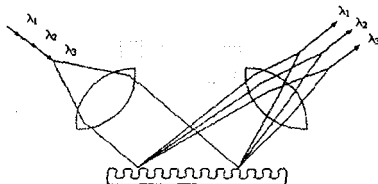


Рис. 27 Мультиплексор на основе дифракционной решетки

3. В схемах на основе оптических фильтров применяются фильтры, изготавливаемые из кварцевого стекла, показатель преломления которого зависит от длины волны. Если значение показателя преломления изменяется по длине световода, лучи с одной частотой отражаются, другие — проходят. Волоконные фильтры на основе брэгговской решетки являются отрезками световода с периодически меняющимся показателем преломления или диаметром ядра. Плоские конструкции выполнены в виде комбинаций стекол с разными показателями преломления. В таких фильтрах проявляется явление брэгговской дифракции. Брэгговские фильтры обладают наилучшей селективностью.

Литература:

- [1] Нойкин Ю.М. «Пассивные компоненты оптической связи»
- [2] В. А. Гуртов «Оптоэлектроника и волоконная оптика. Методическое пособие», 2005 г.
- [3] ГОСТ 2.761-84 ЕСКД. Условные обозначения графические в схемах. Компоненты волоконно-оптических систем передачи
- [4] Т. Окуси, К. Окамото «Волоконно-оптические датчики»; пер. с японского. Энергоатомиздат, 1990 г.

К определению разностного отношения данных натуральных измерений с наименьшей неопределённостью

Л.С. Терехов к.ф.-м.н. (Омский филиал Института математики им. С. Л. Соболева)

Показано, что вещественное число – инструмент математики, не всегда подходящий для отображения величин физики. На основе соотношения неопределённостей предложен алгоритм вычисления отношения разностей данных натуральных измерений с наименьшей неопределённостью.

Ключевые слова: разностное отношение, обобщённое радиолокационное соотношение неопределённостей, оптимальный интервал усреднения, наименьшая неопределённость.

В математическом анализе понятие производной как предела отношения разностей основано на постулате о непрерывности числовой оси и существовании вещественного, точечного числа. Предел отношения разностей

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{x - x_0}$$
 при $x \rightarrow x_0$, если он существует, определяет производную функции $y = f(x)$ по x в точке x_0 :

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = f'(x_0). \quad (1)$$

В выражении (1) все соответствующие символам числа принадлежат области вещественных чисел. Отличие вещественных чисел от чисел, представляющих сомножители соотношения неопределённостей классической физики (СН) или адекватные им неопределённости результатов натуральных измерений, состоит, в частности, в том, что приращения аргумента Δx и соответствующие приращения функции Δy чисел вещественных, могут иметь одновременное стремление к нулю. Иначе в физике: для пары одновременно измеряемых величин, удовлетворяющих СН, например, для частоты f и времени t , приращения Δf и Δt подчинены СН:

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq 1, \quad (2)$$

исключающему возможность их одновременного уменьшения. Что, в свою очередь, исключает и построение производной классического анализа из указанных приращений Δf и Δt . Так, составляя из сомножителей СН (2) отношение $\Delta f / \Delta t = 1 / (\Delta t)^2$, с необходимостью получаем, независимо от вида зависимости $f = f(t)$, расходимость

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta t} \rightarrow \infty. \quad (3)$$

Расходимость (3) указывает на явное различие результатов предельного перехода для действий деления чисел вещественных и чисел, представляющих данные натуральных измерений.

Несовместимость определений пределов в математике (1) и физике (3) приводит к проблеме построения приемлемой оценки разностного отношения данных натуральных измерений.

Понятие погрешности используется в настоящей работе в общепринятом смысле. Неопределённость же, с целью необходимого в настоящей работе чёткого разграничения понятий «погрешность» и «неопределённость», понимается уже вводимого сейчас в метрологии её расширения, то есть - только как неопределённость сомножителей СН.

Отношение разностей натуральных измерений при их уменьшении называется ниже также аналогом производной и ищется как отношение сомножителей обобщённого СН [3]. Обобщение СН проведено на основе его радиолокационной формы [2], отличающейся от формы (2) большей общностью: учитываются отношение μ сигнала к шуму по мощности и форма сигнала α :

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq 1/\alpha\sqrt{\mu}. \quad (4)$$

Для простого сигнала, рассматриваемого в настоящей работе, $\alpha \sim 1$. Область применимости формы СН (4) - явления макроскопического масштаба.

Обобщение СН проведено на примере зависимости частоты от времени на модели гладкой кривой: $f=f(t)$, $f \neq \text{const}$, $df/dt \neq \infty$. Обобщённое СН рассмотрено для полной погрешности измерения частоты $\Delta f(\mu, \Delta t, f'(t))$ и представлено суммой компонентов: известного случайного $\Delta f_r = 1/(2\alpha\sqrt{\mu} \cdot \Delta t)$ и вновь введённого детерминированного компонента $\Delta f_s = f'(t) \cdot \Delta t/2$ [3]:

$$\Delta f(\mu, \Delta t, f'(t)) = \frac{1}{2 \cdot \alpha\sqrt{\mu} \cdot \Delta t} + \frac{f'(t) \cdot \Delta t}{2}. \quad (5)$$

В обобщённом соотношении неопределённостей (5) и далее рассматривается предельный случай СН, которому соответствует знак равенства. Минимизируя целевую функцию $\Delta f(\mu, \Delta t, f'(t))$ по переменной Δt , находим оптимальное время $\Delta t^*(\mu, f'(t))$ и соответствующую ему минимальную погрешность $\Delta f_{\min}(\Delta t^*(t_{i-1}))$. Их перемножение даёт обобщённое СН в «свёрнутом» по сравнению с (5) виде:

$$\Delta t^*(\mu, f'(t)) \cdot \Delta f_{\min}(\Delta t^*(t)) = 1/\alpha\sqrt{\mu}. \quad (6)$$

Качественное отличие обобщённого СН (6) от известных форм (2) и (4) состоит в том, что обобщённое СН выполняется только для квантованных его сомножителей $\Delta t^*(\mu, f'(t))$ и $\Delta f_{\min}(\Delta t^*(t))$. Измерение является лишь частной, упорядоченной человеком последовательностью физических явлений. Поэтому СН (6) остаётся верным и в общем случае, для совокупности физических явлений, к упорядочению которой человек не причастен: обобщённое СН (6) позволяет говорить о замеченном в макроскопической физике явлении - квантовании, область действия которого, в отличие от микрофизики,

ограничена лишь «собственным» квантованием параметров в ходе конкретного макроскопического физического процесса. Если в микромире квантование можно назвать фундаментальной «разметкой» параметра физического объекта константами физики, например, уровнями энергии атома водорода, то макроскопическое квантование (6) – это «разметка» преходящая, ограниченная пределами частного макроскопического процесса.

Одномерная сетка в общем случае неравноотстоящих узлов t_i , соответствующих отсчётам, генерируется в адаптивном процессе измерения. Шаг экстраполяции полагается равным интервалу $\Delta t_i^*(\mu_i, f'(t_i))$, что приводит к рекуррентному соотношению:

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t_i^*(\mu_i, f'(t_i)). \quad (7)$$

Начальный шаг сетки $\Delta t = t_1 - t_0$ устанавливается вручную, исходя из ожидаемых характерных времён измеряемой величины. Далее рекурсия использована в определении собственно интервала $\Delta t_i^*(\mu_i, f'(t_i))$:

$$\Delta t_i^*(\mu, f, t) = 1 / \sqrt{\alpha \sqrt{\mu_{i-1}} \cdot \left| \frac{\Delta f_{\min}(\Delta t_{i-1}^*)}{\Delta t_{i-1}^*} \right|}. \quad (8)$$

Интервал $\Delta f_{\min(i)}(\Delta t_i^*)$ определяется такими же параметрами, что и интервал (8):

$$\Delta f_{\min(i)}(\Delta t_i^*) = \sqrt{\frac{1}{\alpha \sqrt{\mu_{i-1}}} \cdot \left| \frac{\Delta f_{\min}(\Delta t_{i-1}^*)}{\Delta t_{i-1}^*} \right|}. \quad (9)$$

Минимальная неопределённость измерения частоты $\Delta f_{\min(i)}(\Delta t_i^*)$ достигается при выполнении измерительных и вычислительных операций в последовательности (8), (7), (9), составляющих алгоритм, управляющий процессом пошаговой адаптации измерительного интервала $\Delta t_i^*(\mu, f, t)$ к измеряемым параметрам сигнала.

Искомый аналог производной вычисляется непосредственно через отсчёты величин f и t :

$$f(\Delta f_{\min(i)}, \Delta t_i^*) = \frac{f(t_i) - f(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}}. \quad (10)$$

При работе указанного выше алгоритма нахождение производной (10) защищено от получения огреха, иллюстрированного примером (3).

Подтверждением обоснованности развиваемого подхода может служить описание результата численного дифференцирования [1, С.83]. Важным параметром задачи управления была скорость объекта, вычисляемая как отношение приращения координаты к соответствующему интервалу времени Δt . Однако численные эксперименты показывали, что требуемое управление движением нереализуемо из-за резких изменений скорости. Уменьшение интервала Δt не приводило к улучшению дела. В конце концов, проблема была решена путём увеличения интервала Δt в 100 раз по сравнению с

предполагавшимся заранее. Авторы видят объяснение неудачному выбору начального интервала Δt только в росте влияния погрешностей исходных данных и погрешности округления. Однако нельзя исключить и причину погрешности, указываемую огрехом в примере (3).

Необходимость использования оценки аналога производной (10) возрастает с уменьшением макроскопических параметров натуральных измерений. Однако остаётся пока неясным, будет ли включать область применимости развиваемого подхода также и параметры явлений микромира.

Литература:

[1] Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. Численные методы М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001, 632с.

[2] Сколник М. Введение в технику радиолокационных систем. М.: Мир, 1965. 520 с.

[3] Л.С. Терехов Оценка производной на основе обобщённого соотношения неопределённостей//Изв. вузов. Физика.– 2008. - № 9/2. С. 84-89.